



**André Coutinho  
Ferreira**

**Aquisição de Sinais Sísmicos com Arduino em  
Materiais de Construção: Identificação de  
Heterogeneidades**



**André Coutinho  
Ferreira**

**Aquisição de Sinais Sísmicos com Arduino em  
Materiais de Construção: Caracterização e  
Identificação de Heterogeneidades**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Fernando Almeida do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Jorge Manuel Girão Medina**

professor auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Rui Marques Moura**

professor auxiliar convidado da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

**Prof. Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida**

professor associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

A realização desta dissertação apenas foi possível devido à participação de diferentes intervenientes. Deste modo, desejo expressar publicamente os meus agradecimentos a todas as pessoas e entidades que me apoiaram na realização, nomeadamente:

Ao Prof. Fernando Almeida pelo apoio, pela constante disponibilidade, pelos ensinamentos, pelo conhecimento transmitido na área da Geofísica e pela motivação e dedicação demonstradas ao longo da dissertação. Acrescento ainda que os conhecimentos transmitidos ao longo do curso despertaram um especial interesse pela área da Geofísica, especialmente na construção de equipamentos especializados.

Aos meus pais, irmã e família mais chegada, por terem estado sempre ao meu lado, pela compreensão, paciência, e pelo apoio incondicional ao longo de diferentes etapas.

A todos um bem haja.

**palavras-chave**

Geofísica, Sísmica, NDT, Arduino, Tomografia, Transmissão, Reflexão, Piezoeléctrico, transdutores.

**resumo**

Na presente dissertação foi construído um circuito e transdutores para que com recurso a um Arduino Due possam fazer-se medições de velocidades de propagação das ondas sísmicas em três elementos activos de suporte estruturais em construção civil. Esses elementos são, uma viga em betão armado, e dois blocos de alvenaria, um em calcário e o segundo em granito. A partir dos perfis sísmicos obtidos foram feitas tomografias para as velocidades de propagação de ondas sísmicas, e identificadas heterogeneidades nos três elementos. Assim viabilizando a aplicação do sistema construído na detecção de anomalias estruturais.

**keywords**

Geophysics, Seismic, NDT, Arduino, Tomography, Transmission, Reflection, Piezoelectric, transducers.

**abstract**

At the dissertation here presented, it was built a circuit and transducers, so that with the use of an Arduino Due, it was possible to determine the seismic velocity in three structural elements used in civil construction. A reinforced concrete beam, and two stone blocs, one in limestone and the other in granite. From the seismic profiles obtain, it was done tomography of the seismic wave velocity, and the identification of anomalies. Hence proving the viability of the built circuit to detect structural anomalies.



# Índice

Índice:	i
Índice de tabelas:	iii
Índice de figuras:	iv
1. Introdução:	1
1.1. Enquadramento geral:	1
1.1. Objectivos:	1
1.2. Estrutura do Trabalho:	2
2. Enquadramento:	5
2.1. Prospeção Sísmica:	5
2.2. Equação de onda:	6
2.3. Refracção das Ondas Sísmicas:	10
2.4. Coeficientes de Transmissão e Reflexão:	11
2.4.1. Aspecto Acústico de Edifícios:	13
2.5. Teoria da Inversão e Tomografia:	13
2.5.1. Tomografia Sísmica:	14
2.5.1.1. Formulação matemática da tomografia por tempo de transiluminação:	15
2.5.1.2. Discretização do problema:	16
2.6. Breve Enquadramento Histórico do Mosteiro de Leça de Balio:	17
3. Estado D'Arte:	21
3.1. Materiais Piezoeléctricos:	21
3.2. Dispositivos <i>bender</i> piezoeléctricos em <i>cantilever</i> :	26
3.3. NDT:	28
3.4. Arduino:	31
4. Materiais e Métodos:	35
4.1. Instrumentação:	35
4.2. Transdutor piezoeléctrico:	41
4.3. Software:	42
4.3.1. GNU Octave:	42
4.3.2. SeismicPanel:	43
5. Discussão de Resultados:	45
5.1. Geometria do ensaios:	45
5.1.1. Viga de Betão Armado:	45
5.1.2. Bloco de Alvenaria em Calcário:	47

5.1.3. Bloco de Alvenaria em Granito:.....	50
5.2. Aquisição e Stack:.....	51
5.3. Tomografia por Tempo de Transiluminação e Velocidade Sísmica:.....	53
5.3.1. Viga em Betão Armado:.....	53
5.3.2. Bloco de Alvenaria em Calcário:.....	61
5.3.3. Bloco de Alvenaria em Granito:.....	64
5.4. Frequência de resposta dos transdutores:.....	67
6. Conclusões:.....	69
Bibliografia:.....	70
Anexos.....	74
Anexo 1.....	75
Anexo 2.....	76
Anexo 3.....	78
Anexo 4.....	79
Anexo 5.....	81
Anexo 6.....	83
Anexo 7.....	84
Anexo 8.....	89
Anexo 9.....	94
Anexo 10.....	95
Anexo 11.....	98
Anexo 12.....	105
Anexo 13.....	108
Anexo 14.....	109

## Índice de tabelas

Tabela 1: Comparação entre Arduino Uno e Due, Atmel (2015(a)) e Atmel (2015(b)) .....	32
Tabela 2: Cálculo dos valores de reflexão de ondas sonoras que se originam no ar, Z (impedância), R(Coeficiente em termos de energia).....	64

# Índice de figuras

Figura 1: Incidência da onda sísmica com ângulo $\theta_c$ e determinação da frente de onda que retorna à superfície (onda refractada). pelo princípio de Huygens determina-se que o ângulo $\theta$ é igual a $\theta_c$ . Adaptado de Telford et al., (1990).....	10
Figura 2: Esquema representativo de dois meios com impedâncias sísmicas distintas e das ondas sísmicas incidentes. .	11
Figura 3: Discretização do modelo de velocidades para a tomografia por tempo de transiluminação. Mostra-se a escolha feita para identificar cada célula do modelo e como é definido cada componente da matriz L, adaptado de Berryman (1991).....	17
Figura 4: Imagem antiga da fachada sul do Mosteiro de Leça do Balio, imagem obtida no portal da união de freguesias Custóias, Leça do Balio e Guifões, (2016).....	18
Figura 5: Fachada sul do convento, e local onde se localizava a casa do Sacristão, já não presente.....	19
Figura 6: Estrutura cristalina de um cerâmico piezoelétrico, antes e depois da polarização, adaptado de Ledoux (2011). .....	22
Figura 7: Método de poling de materiais piezoelétrico cerâmico, adaptado de Ledoux (2011).....	23
Figura 8: Reacção de um material piezoelétrico polarizado a uma tensão aplicada, adaptado de Ledoux (2011).....	24
Figura 9: Beders piezoelétricos em cantilever, (a) Uniforme, (b) biforme, adaptado de Charnegie (2007).....	26
Figura 10: Esquema de um bender piezoelétrico em cantilever, adaptado de Charnegie (2007).....	27
Figura 11: Bloco-Diagrama do sistema de aquisição de dados sísmicos MEDA-3B, adaptado de Liu et al., (2005).....	30
Figura 12: Diagrama esquemático de um transdutor de cristal piezoelétrico do tipo SYD-II, adaptado de Liu et al. (2005).....	30
Figura 13: Arduino Due.....	31
Figura 14: Esquema eléctrico de um divisor de tensão, adaptado de Recktenwald (2012).....	35
Figura 15: Esquema do fluxo das correntes num divisor de tensão, adaptado de Recktenwald (2012).....	36
Figura 16: Esquema da ligação dos Op-Amps ao divisor de tensão no Input, imagem obtida por Fritzing.....	38
Figura 17: Esquema de uma fonte sísmica (martelo + base) com disparo por contacto.....	39
Figura 18: Esquema do Arduino e do circuito corroborante, obtida por Fritzing.....	40
Figura 19: Esquema de um bender piezoelétrico do tipo biforme em cantilever. A vermelho estão representados os eléctrodos.....	41
Figura 20: Dispositivo bender piezoelétrico em cantilever construído para efeito neste projecto.....	42
Figura 21: Painel principal do software de cálculo computacional GNU Octave, Versão 4.2.0.....	43
Figura 22: Painel principal do Software de tomografia sísmica, SeismicPanel.....	44
Figura 23: Vista inferior da viga e dos transdutores colados.....	45



Figura 24: Esquema da geometria de aquisição da viga de betão armado. A verde estão representados os locais dos tiros e a vermelho os locais onde os transdutores foram acoplados, imagem não à escala.....	46
Figura 25: Vista superior da viga, presentes: a fita métrica, a fonte sísmica (martelo) e o trigger (conjunto martelo/conductor eléctrico).....	46
Figura 26: Disposição dos transdutores na lateral da alvenaria em calcário.....	47
Figura 27: Esquema da geometria de aquisição no bloco de alvenaria em calcário. A verde estão representados os locais dos tiros e a vermelho os locais onde os transdutores foram acoplados, imagem não à escala.....	48
Figura 28: Vista lateral do bloco de alvenaria em calcário, a vermelho está a numeração dos locais de tiro, estes encontram-se exactamente opostos aos transdutores.....	49
Figura 29: Bloco de alvenaria em granito no qual se efectuou o ensaio sísmico, é de notar a escritura: “Cruz singela 1288”.....	50
Figura 30: Esquema da geometria de aquisição do bloco de alvenaria em granito. A verde estão representados os locais dos tiros e a vermelho os locais onde os transdutores foram acoplados, imagem não à escala.....	51
Figura 31: Exemplo dos dados obtidos após o stacking, dados obtidos na viga de betão armado, escala vertical em mV (nota que é um stack de 10x, pelo que o valor real de tensão será uma divisão por 10) escala horizontal em segundos, GNU Octave 4.0.0.....	52
Figura 32: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 3, e ajuste da hipérbole, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,2, GNU Octave.....	54
Figura 33: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, e ajuste da hipérbole, canal 3, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,2. A vermelho está realçada uma possível reflexão que o sinal sofre na fractura observada. GNU Octave.....	55
Figura 34: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação na viga de betão armado, inversão tomográfica com raios curvos, velocidades entre 2000 e 3600 ms <sup>-1</sup> .....	56
Figura 35: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação na viga de betão armado, inversão tomográfica com raios curvos, e velocidades entre 2000 e 3600 ms <sup>-1</sup> . A vermelho realça-se uma faixa de menor velocidade.....	56
Figura 36: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação na viga de betão armado, inversão tomográfica com raios curvos, e velocidades entre 2000 e 3500 ms <sup>-1</sup> . A vermelho realça-se uma faixa de menor velocidade.....	57
Figura 37: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, e ajuste da hipérbole, canal 10, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,1. A vermelho está representada uma reverberação do sinal sísmico, provavelmente devido à fractura. GNU Octave.....	58
Figura 38: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 10, a seta a vermelho indica o local de tiro, e a linha a vermelho indica o local onde a fractura se encontra, 200 pontos, escala 0,000025.....	59

Figura 39: Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos na viga, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist, GNU Octave.....	60
Figura 40: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, e ajuste da hipérbole, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,15, canal 8, GNU Octave.....	61
Figura 41: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação no bloco de alvenaria em calcário, inversão tomográfica com raios curvos, velocidades entre 1200 e 2800 ms-1.....	62
Figura 42: Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist, GNU Octave.....	63
Figura 43: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, e ajuste da hipérbole, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,15, canal 3, GNU Octave.....	64
Figura 44: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação no bloco de alvenaria em granito, inversão tomográfica com raios curvos, velocidades entre 1200 e 2200 ms-1.....	65
Figura 45: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação no bloco de alvenaria em calcário, inversão tomográfica com raios curvos, e velocidades entre 1500 e 2300 ms-1.....	65
Figura 46: Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist, GNU Octave.....	66

# **1. Introdução:**

## **1.1. Enquadramento geral:**

Este trabalho foi realizado na área da geofísica com o objectivo de caracterização de velocidades de propagação de ondas sísmicas em vários elementos activos de suporte em construção civil e com isso avaliar anomalias estruturais.

A velocidade de propagação das ondas sísmicas ou o tempo que estas demoram para atravessar um material, está intrinsecamente ligado a parâmetros mecânicos, pelo que a sua caracterização é fundamental para compreender e identificar possíveis anomalias estruturais. Essa compreensão é indispensável na reabilitação de património edificado.

É importante também referir que a medição da velocidade de propagação das ondas sísmicas pode ser um factor importante no estudo da repartição energética para compreensão das ressonâncias na alvenaria, e a razão pela qual edifícios construídos em materiais com elevadas impedâncias sísmicas formam escudos sonoros. O som não se propaga de dentro para fora, nem de fora para dentro desses edifícios, um exemplo disso são as igrejas e catedrais em granito.

Neste projecto foi então desenvolvida instrumentação com o objectivo da medição de velocidades através do hardware livre Arduino, e foram também construídos sensores (transdutores) para a conversão da energia mecânica das ondas sísmicas em energia eléctrica mensurável.

Estes instrumentos foram aplicados em três materiais, usados em construção civil, e foram então identificadas as suas heterogeneidades.

## **1.1. Objectivos:**

Este trabalho tem como objectivo principal a determinação da velocidade das ondas sísmicas em elemento activos de suporte em construção civil, como alvenarias em pedra e vigas de betão armado.

Para medir a velocidade das ondas sísmicas tem de se construir a instrumentação de aquisição, e dos transdutores para conversão directa da energia mecânica das ondas

sísmicas em energia eléctrica, nesta parte do trabalho o objectivo é manter os custos mais baixos possíveis.

O terceiro objectivo é de identificar anomalias estruturais dos vários elementos de suporte.

O ultimo objectivo será de avaliar a viabilidade da instrumentação e dos transdutores.

## **1.2 Estrutura do Trabalho:**

A presente dissertação está organizada em sete capítulos, incluindo este primeiro de carácter introdutório.

Neste capítulo faz-se um enquadramento da temática abordada, definem-se os principais objectivos e é realizada uma síntese da organização da dissertação.

O capítulo 2 serve como introdução teórica aos métodos existentes, com uma breve referência à importância e historia da prospecção sísmica, à equação de onda e à sua resolução em ordem a obter as velocidades de propagação sísmica das ondas P e S. Procura-se também dar uma referencia teórica da refacção de ondas sísmicas, da teoria da inversão e tomografia sísmica e dos coeficientes de transmissão e reflexão. Também neste capítulo se faz uma breve referencia histórica dos blocos de alvenaria ensaiados neste trabalho.

O capítulo 3 faz-se referencia ao estado de arte existente. Faz-se uma breve introdução à história e aplicação de materiais piezoeléctricos, das vários tipos de dispositivos *bender* piezoeléctricos em *cantilever*, dos métodos NDT e equipamentos existentes. Faz também referencia à placa de desenvolvimento livre Arduino e da escolha optada.

No capítulo 4 descrevem-se os métodos utilizados no desenvolvimento do circuito corroborante ao Arduino, da construção do transdutores piezoeléctricos e da utilização e funcionamento do sistema de disparo. Faz-se também referencia ao software utilizado: GNU Octave e SeismicPanel.

No capítulo 5 procura-se discutir os resultados obtidos com a aplicação dos diferentes métodos discutidos no capítulo 4. Neste capítulo comparam-se, num dos ensaios, os métodos de tomografia sísmica por tempo de transiluminação e, com as representações gráficas dos sinais sísmicos, na identificação de heterogeneidades.

Por último, no capítulo 6 são enumeradas as principais conclusões o trabalho desenvolvido, e são apontados alguns caminhos para o desenvolvimento de trabalhos futuros.



## **2. Enquadramento:**

### **2.1. Prospecção Sísmica:**

A prospecção sísmica é de longe o método geofísico mais importante em termos de investimento e número de geofísicos envolvidos. O seu predomínio é favorecido pela sua alta precisão, alta resolução e penetração. O maior emprego dos métodos sísmicos é na exploração petrolífera, em que, a localização dos poços exploratórios é raramente obtida sem informação sísmica.

Sucintamente a prospecção sísmica baseia-se no estudo da propagação de ondas mecânicas que se propagam num meio material, não se propagando no vazio.

Uma onda mecânica é uma onda formada pela oscilação de matéria, e portanto, existe uma transferência energética num meio material. Assim, uma onda mecânica transporta energia que se propaga na mesma direcção da onda. Outro aspecto importante é que estas ondas podem apenas ser geradas num meio que tenha elasticidade e inércia.

Para gerar ondas mecânicas é necessário uma fonte energética, uma vez que essa energia é fornecida ao sistema a onda viaja através do meio até que toda a sua energia é transferida.

Outra propriedade importante é que a amplitude das ondas mecânicas é medida pelo deslocamento dividido pelo comprimento de onda, Serway (1992).

A técnica básica de exploração sísmica consiste na geração de uma onda sísmica e na medição dos tempos necessários para que esta viaje da fonte sísmica aos receptores/geofones, na literatura esses tempos são designados como *travel times*, Telford (1990). A partir desses tempos e da velocidade de propagação das ondas, é possível reconstruir o caminho das ondas sísmicas. A informação estrutural do meio é obtida principalmente a partir de ondas cujos caminhos entram em duas categorias: ondas refractadas, onde porção principal do caminho faz-se na fronteira de duas impedâncias acústicas diferentes, integralmente a onda propaga-se na horizontal, e onda reflectida, em que a onda que viaja sem sentido descendente a partir do local da fonte sísmica, e é reflectida novamente para a superfície, neste caso a onda propaga-se principalmente na

vertical. Para ambas as ondas, tanto refractadas como reflectidas, a velocidade de propagação depende de propriedades mecânicas do meio.

As ondas sísmicas podem ser divididas em duas grandes categorias, as ondas de corpo ou volume e as ondas de superfície.

As ondas de corpo ou volume propagam-se através do interior do meio. Apresentam percursos radiais, deformados caso existam variações de densidade ou de velocidade do meio. Existem dois tipos de ondas de corpo: primários, ondas P, e secundárias ondas S.

As ondas P ou primárias têm uma velocidade de propagação maior do que as ondas S, são ondas longitudinais, que fazem o meio vibrar paralelamente à direcção da onda, um exemplo ilustrativo é o do elástico em contracção. Verifica-se nestas ondas, alternadamente compressão seguida de uma distensão com amplitudes e períodos baixos, impondo aos corpos sólidos elásticos alterações de volume, Milsom (2003).

As ondas S ou secundárias são ondas transversais ou de cisalhamento, o que significa que o meio é deslocado perpendicularmente à direcção de propagação, como por exemplo o chicote. Estas ondas provocam alterações morfológicas, contudo não há alteração de volume, Telford et al., (1990).

As ondas de superfície podem ser divididas em dois tipos: ondas *Rayleigh* e ondas *Love*.

Quando se tratam de ondas sísmicas é preciso fazer referencia à equação de onda, cuja resolução, sucede à obtenção da velocidade das ondas P e das ondas S.

## **2.2. Equação de onda:**

Primeiramente para a obtenção da equação de onda tem de conhecer-se a teoria da elasticidade, em que, a forma e tamanho de um corpo elástico podem variar quando aplicada uma força externa. Essa força é então contrabalançada por forças internas opostas que resistem às mudanças físicas ocorridas ao corpo, em resultado o corpo tende a voltar à sua condição de forma e tamanho inicial quando as forças externa são removidas. Esta propriedade de resistência à mudança de forma e tamanho é chamada de elasticidade.

Um corpo perfeitamente elástico é aquele que volta ao seu estado inicial quando a



força externa é retirada, muitas substâncias, incluindo rochas são consideradas perfeitamente elásticas, sem erros consideráveis.

Na teoria de elasticidade as forças aplicadas resultam numa mudança temporária de forma e tamanho. A relação entre forma e tamanho é expressa em termos de tensão e deformação.

Por definição tensão é força aplicada por unidade de área.

Quando a força é perpendicular à área à qual está a ser aplicada diz-se normal, quando é paralela diz-se de corte, e quando não é paralela nem perpendicular, esta pode ser resolvida em termos de tensão normal e de corte, através de regras de trigonometria.

Para simplificação, considera-se um pequeno elemento de volume, em que as tensões actuantes em cada uma das seis faces podem ser resolvidas para as duas faces perpendiculares e no mesmo eixo.

Quando um corpo elástico é sujeito a uma tensão sofre uma mudanças de forma e dimensão, a essas mudanças dá-se o nome de deformação.

Com essa mudança de forma existe um deslocamento dos vários vértices do elemento de volume, a partir disso, podem escrever-se as equações de deslocamento, e a partir desse ponto podem escrever-se as equações de deformação normal e de corte.

Agora para relacionar a tensão com deformação, aplica-se a lei de Hooke, em que uma dada deformação é directamente proporcional à tensão. Quando existem várias tensões cada uma produz uma deformação independentemente das outras. Consequentemente, a deformação total é a soma das deformações produzidas por tensões individuais, ou seja, cada deformação é uma função linear de todas as tensões e vice-versa. A lei de Hooke faz a relação entre tensão e deformação, tirando partido das constantes de Lamé, sendo uma dessas constantes o módulo de rigidez, Telford et al., (1990).

Até agora o sistema esteve em equilíbrio estático, no caso da propagação de uma onda sísmica tem de considerar-se um sistema dinâmico.

Considera-se para simplificação matemática a tensão aplicada paralela com o eixo dos  $xx$ . Com o movimento, as tensões aplicadas passam a ser a tensão mais a variação da tensão com o deslocamento segundo o eixo dos  $xx$ . Tendo em conta as tensões internas e opostas à tensão aplicada, fica-se apenas com as várias componentes da variação da tensão

com o deslocamento segundo o eixo dos xx. As tensões aplicadas numa face afectam todo o elemento de volume assim pode obter-se a força por unidade de volume.

A segunda lei de Newton enuncia que as forças em desequilíbrio são iguais à massa a multiplicar pelo aceleramento. Aplicando essa lei obtém-se a equação de movimento, nesta equação o densidade tem expressão, pelo que é uma variável. Agora aplica-se a lei de Hooke para substituir as tensões por deformações e exprimir as deformações em termos de deslocamentos usando as equações de deformação dilatância e as equações da lei de Hooke. Obtendo-se as equações de onda generalizada nas três direcções do espaço para as ondas sísmicas:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda' + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda' + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda' + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (3)$$

Como as ondas P são dilatacionais, irrotacionais e compressionais, então aplica-se o divergente às equações de onda generalizada nas três direcções do espaço (1), (2) e (3) para obter a equação de onda das ondas P:

$$\frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = \nabla^2 \Delta \quad (4)$$

em que:

$$\alpha^2 = \frac{\lambda' + 2\mu}{\rho} \quad (5)$$

A velocidade das ondas P ( $v_p$ ) é dada por  $\alpha$ :

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{\lambda' + 2\mu}{\rho}\right)} \quad (6)$$

Por sua vez as ondas S são transversas e rotacionais, então aplica-se o rotacional às equações de onda generalizada nas três direcções do espaço (1), (2) e (3) para obter a equação de onda das ondas S:

$$\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \nabla^2 x \quad (7)$$

em que:

$$\beta^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

A velocidade das ondas S ( $v_s$ ) é das por  $\beta$ :

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)} \quad (9)$$

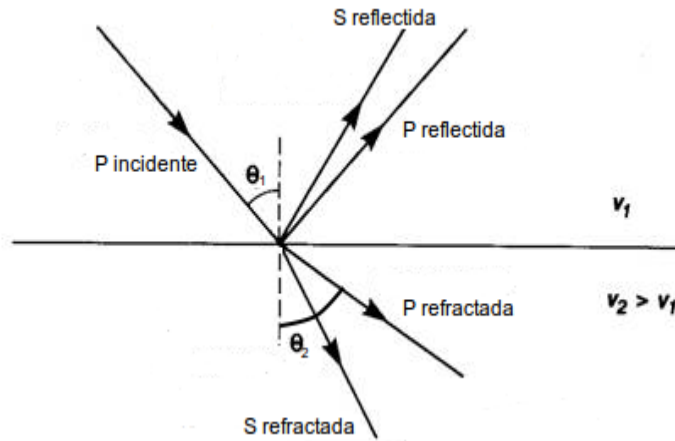
Através das resolução da equação de onda prova-se que a velocidade das ondas sísmicas depende de parâmetros mecânicos do meio que atravessam.

Na prática verifica-se que as unidades que as ondas sísmicas atravessam são anisotrópicas ou seja, têm impedâncias sísmicas diferentes.

Neste trabalho os métodos sísmicos utilizados são do tipo transiluminação por isso dar-se-à ênfase à refração sísmica.

### 2.3. Refracção das Ondas Sísmicas:

O fenómeno de refração é uma mudança na direcção de propagação de uma onda ao atravessar a interface que separa dois meios com diferentes velocidades, sendo regida pela Lei de Snell inclusive para ondas sísmicas. Considerando a existência de duas camadas com velocidades de ondas P diferentes, a primeira com velocidades de propagação das ondas sísmicas inferior à da segunda camada  $V_2 > V_1$ , verifica-se uma mudança de direcção de acordo com a lei de Snell equação (10), e geram-se ondas S convertidas fig. 1, Para uma compreensão mais detalhada da equipartição da energia na interface há de se considerar as equações de Zeppritz, Telford et al., (1990).



*Figura 1: Incidência da onda sísmica com ângulo  $\theta_c$  e determinação da frente de onda que retorna à superfície (onda refractada). pelo princípio de Huygens determina-se que o ângulo  $\theta$  é igual a  $\theta_c$ . Adaptado de Telford et al., (1990).*

A Lei de Snell enuncia a o desvio angular sofrido por uma onda ao passar por meios com índices de refração diferentes, ou seja descreve a relação entre os ângulos de incidência e refração com a velocidade de propagação das ondas no meio.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (10)$$

#### 2.4. Coeficientes de Transmissão e Reflexão:

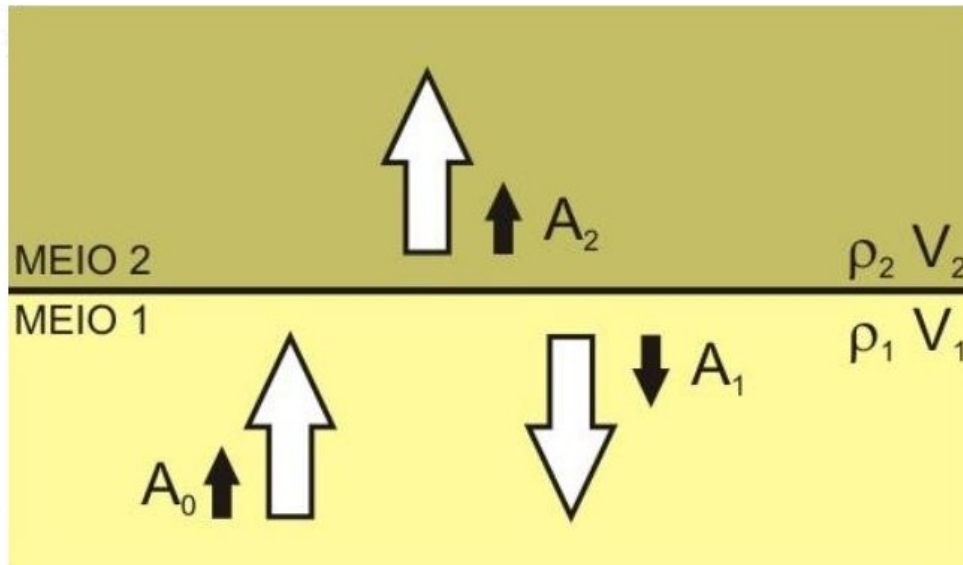


Figura 2: Esquema representativo de dois meios com impedâncias sísmicas distintas e das ondas sísmicas incidentes.

Sempre que as ondas sísmicas passam duas unidade com impedâncias sísmicas distintas, ocorre uma refração e uma reflexão dessas ondas, como falado no sub-capítulo 2.3.

Aquando desse processo a energia da onda sísmica inicial é dividida entre a onda reflectida e a onda refractada, o somatório da energias das ondas resultantes é equivalente à energia da onda sísmica inicial.

A fig. 2 mostra dois meios com impedâncias sísmicas diferentes as setas indicam a direcção das ondas sísmicas,  $A_0$  é a amplitude da ondas sísmica inicial,  $A_1$  e  $A_2$ , são respectivamente as ondas reflectida e refractada.

A impedância sísmica  $Z$  de um meio é dada pelo produto da velocidade das ondas sísmicas  $v$  pela densidade do meio  $\rho$ :

$$Z = \rho v \quad (11)$$

O coeficiente de transmissão em termos de amplitude de onda  $t$  é dado por:

$$t = \frac{A_2}{A_0} \quad (12)$$

ou seja, em termos de impedância:

$$t = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (13)$$

O coeficiente de reflexão em termos de amplitude de onda  $r$  é dado por:

$$r = \frac{A_1}{A_0} \quad (14)$$

ou seja, em termos de impedância:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (15)$$

Em termos de energia os coeficientes de Transmissão  $T$  e Reflexão  $R$ , respectivamente, são dados por:

$$T = \frac{Z_2 A_2^2}{Z_1 A_0^2} = \frac{4Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (16)$$

$$R = \frac{Z_1 A_1^2}{Z_1 A_0^2} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} = r^2 \quad (17)$$

É de notar que os coeficientes de transmissão e reflexão não dependem da frequência da onda sísmica, podendo ser utilizado para ondas de qualquer frequência ou pela

sobreposição de ondas com várias frequências, ou seja, este coeficiente é válido tanto para ondas harmónicas como para qualquer outro tipo de onda sísmica.

#### **2.4.1. Aspecto Acústico de Edifícios**

Como visto anteriormente as ondas acústicas são ondas mecânicas e só se propagam num meio material, assim pode dizer-se que as ondas acústicas e sísmicas são essencialmente idênticas e portanto podem tratar-se da mesma forma.

Como visto no sub-capítulo 2.4., materiais com impedâncias diferentes conferem diferentes coeficientes de transmissão e reflexão, parâmetros esses que podem conferir ao edifício propriedades acústicas desejáveis. Pelo rácio de energia que é reflectido ou transmitido quando uma onda acústica incide num material, pode definir-se uma qualidade acústica.

Por exemplo se tivermos uma câmara revestida a madeira de pinheiro, com velocidade média de propagação das ondas sísmicas de  $1000\text{ms}^{-1}$  e densidade média e  $0,4\text{gcm}^{-3}$ , Lousada et al., (2008) e sabendo que a velocidade do som no ar é de aproximadamente  $330\text{ms}^{-1}$  e a sua densidade média é  $0,001225\text{gcm}^{-3}$ , Jones (1978), então pela fórmula do coeficiente de reflexão, 99,6% da energia das ondas sonoras é reflectida de volta para dentro da câmara. No Anexo 6 são apresentados os cálculos efectuados.

É necessário ter em conta que neste cálculos não se toma em consideração outras propriedades acústicas, como a forma e a rugosidade das superfícies, e serve apenas como indicador quantitativo. Ainda assim pode ter-se uma ideia de propriedades acústicas básicas de materiais componentes de edifícios.

#### **2.5. Teoria da Inversão e Tomografia:**

A teoria da inversão sistematiza as técnicas matemáticas de inversão, definindo rigorosamente as técnicas disponíveis, Menke (1989).

A tomografia sísmica é um tipo particular de problema inverso.

### 2.5.1. Tomografia Sísmica:

A palavra tomografia vem do Grego, “tomos” significa secção e “grafos” que significa desenhar, representar, Jones (2010). Tomografia pode então ser entendida como a obtenção de alguma propriedade de um meio estudado através de medidas externas ao mesmo, a fim de obter os valores da propriedade de interesse. Uma definição mais formal de tomografia é: “A ideia da tomografia é usar valores observados de uma grandeza a qual está relacionada por uma integral de linha ao parâmetro físico que se deseja inferir”, Scales et al., (2001).

Há vários tipos de tomografia sísmica, cada uma possuindo limitações e vantagens. Conforme esperado, quanto mais preciso possível for o resultado pela técnica escolhida, mais dispendioso computacionalmente será a aplicação. A seguir enunciam-se os principais tipos de tomografia sísmica disponível, Jones (2010):

1. Baseada em traçado por raios (*ray tracing*)
  - Tomografia por tempo de reflexão;
  - Tomografia por transiluminação;
  - Tomografia por tempo de refração.
2. Baseada na forma da onda (*Waveform*), aplicação da equação de onda (*FWI, Full Waveform Inversion*)

Actualmente, o estudo da arte para a tomografia sísmica é a *FWI*, visto ser a técnica que pode fornecer os melhores resultados, Wang et al., (2011).

Neste trabalho estudou-se um tipo particular de tomografia por tempo de transiluminação.



### 2.5.1.1. Formulação matemática da tomografia por tempo de transiluminação:

Neste tipo de tomografia, considera-se o trajecto que a onda sísmica (aqui consideram-se apenas ondas P) faz entre a fonte e o receptor descrito por um raio e assim este tempo  $t$  (para o par fonte-receptor) é dado pela seguinte equação:

$$t = \int_c u(r) dl \quad (18)$$

Onde  $u(r)$  é a lentidão,  $c$  é o caminho de integração,  $r$  é o vector posição e  $dl$  é o comprimento de arco infinitesimal ao longo do caminho de integração.

A não-linearidade da equação anterior, ocorre porque o caminho de integração é função da lentidão Zhdanov (2002):

$$c = c(u(r)) \quad (19)$$

que é a função a ser integrada. Isto também pode ser entendido ao notar-se que a trajectória do raio está directamente relacionada à distribuição de lentidão do meio. Para linearizar este problema, basta expandir a equação em série de Taylor, em torno de um modelo de lentidão inicial  $u$ , até ao termo de primeira ordem, Martins (1992):

$$t(u) = t(u^0) + \left[ \frac{\partial}{\partial u} \int_c u(r) dl \right]_{u=u^0} + (u - u^0) \quad (20)$$

onde  $u^0$  é a lentidão inicial escolhida,  $t(u^0)$  é o tempo para o raio atingir o receptor ao se considerar o campo de lentidão  $u^0$ .

Da equação anterior (13) obtém-se:

$$\delta t = \frac{\partial t_0}{\partial u} \delta u \quad (21)$$

onde:

$$t_0 = \left[ \int_c u(r) dl \right]_{u=u^0} \quad (22)$$

que corresponde ao tempo e percurso da fonte ao receptor para o campo de lentidão  $u^0$ .

### 2.5.1.2. Discretização do problema:

Da equação anterior fica fácil discretizar o problema, o que permite compreender como resolvê-lo na prática. Para tal, divide-se o modelo estudado em  $n$  células quadradas (outros tipos de discretizações são possíveis, Lines (2004)) e consideram-se  $m$  receptores, então a equação fica:

$$\delta t_i = \sum_{j=1}^n l_{ij} \delta u_j \quad (23)$$

E então, vectorizando-se o problema:

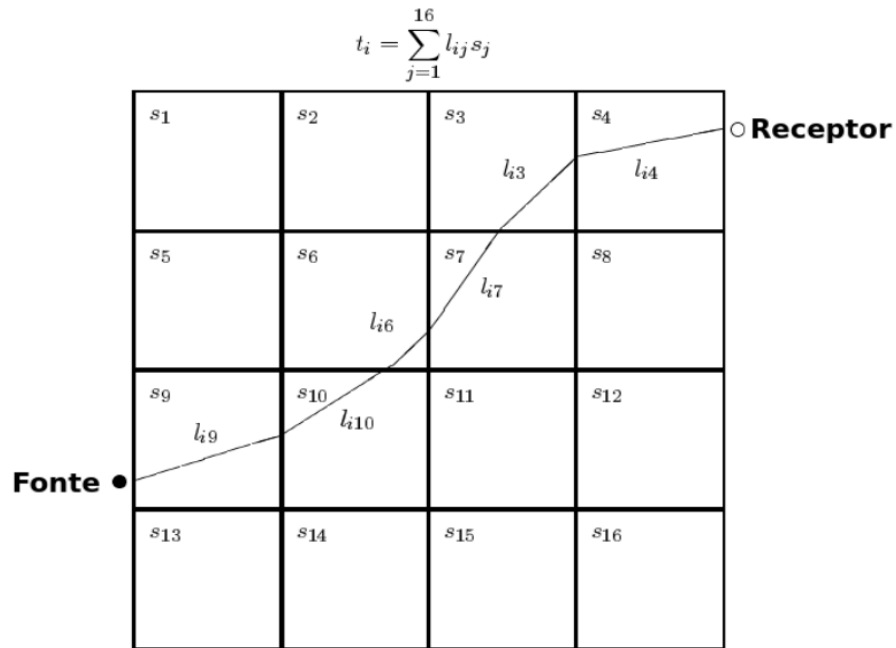
$$\delta \mathbf{t} = \mathbf{L} \delta \mathbf{u} \quad (24)$$

O cálculo dos tempos de trânsito para cada raio é feito de maneira discreta. Para isso, pode-se escrever uma expressão como:

$$\mathbf{t} = \mathbf{L} \mathbf{u} \quad (25)$$

onde o vector coluna  $\mathbf{t}$  tem  $m$  linhas  $m \times 1$ , o vector coluna  $\mathbf{u}$  tem  $n$  linhas  $n \times 1$  e matriz  $\mathbf{L}$  tem dimensão  $m \times n$ . A matriz  $\mathbf{L}$  é chamada de matriz tomográfica ou sensibilidade. Cada linha da matriz  $\mathbf{L}$  representa um raio traçada e cada coluna desta matriz está associada a um parâmetro. Além disso,  $\mathbf{L}$  é uma matriz esparsa, ou seja, com praticamente todos os elementos nulos.

Para fácil interpretação do que é supracitado a fig. 3 representa a matrização tomográfica.



*Figura 3: Discretização do modelo de velocidades para a tomografia por tempo de transiluminação. Mostra-se a escolha feita para identificar cada célula do modelo e como é definido cada componente da matriz  $L$ , adaptado de Berryman (1991).*

## 2.6. Breve Enquadramento Histórico do Mosteiro de Leça de Balio:

Neste trabalho foram estudadas as velocidades de propagação de ondas sísmicas em diferentes elementos tipicamente presentes em construção civil, um desses elementos é um bloco de granito com uma inscrição (letreiro) que se encontra presente no Mosteiro de Leça do Balio.

Este Mosteiro localiza-se na povoação de Leça de Balio, no concelho de Matosinhos, distrito do Porto.

Acredita-se que onde está edificado o Mosteiro actual terá existido em templo Romano dedicado a Júpiter. Actualmente poderá assumir-se que o remanescente desse templo Romano seja a fundação da torre do mosteiro, Santos (2015).

Ao longo do Século XI é referida a existência de um mosteiro antigo, em que alguns mas poucos elementos são ainda hoje visíveis, Santos (2015).

No Século XII o couto de Leça foi doado à ordem dos Hospitalários durante o reinado de D. Afonso Henriques, Barboza (1852). Com os Hospitalários o mosteiro primitivo recebeu mais ampliações e reformas que lhe deram feições de natureza militar em estilo Românico, cujo elemento mais marcante é a torre ameada, Santos (2015). O templo actual, que se compõe por uma mistura de estilos Românico e Gótico, foi criação de uma grande campanha construtiva que ocorreu entre 1330 e 1336.

O bloco de alvenaria (letreiro) estudado neste trabalho terá feito parte do mosteiro primitivo de construção Hospitalária, Barboza (1852), descreveu esse letreiro como tendo estado no costão da antiga muralha, que vinha da igreja, e esteve na parede da casa do Sacristão, encostada à fachada sul da igreja, a fig. 4 mostra a casa do Sacristão, encostada na fachada sul da igreja.



*Figura 4: Imagem antiga da fachada sul do Mosteiro de Leça do Balio, imagem obtida no portal da união de freguesias Custóias, Leça do Balio e Guifões, (2016).*

Segundo as descrições anteriores às demolições efectuadas em 1844, o edifício conventual desenvolvia-se para sul da igreja. A porta sul serviria assim de ligação principal entre a igreja e o restante complexo conventual, Santo (2015), fig. 4.



*Figura 5: Fachada sul do convento, e local onde se localizava a casa do Sacristão, já não presente.*

Actualmente o Letreiro encontra-se no chão à esquerda de quem entra na igreja pela porta lateral, fig. 5.

A fig. 29, no capítulo 5, mostra o letreiro em que as letras foram realçadas com recurso a giz branco, o letreiro começa por uma cruz singela, e mostra a era em letra do tempo de 1288, que é o ano de 1250, Barboza (1852).



### 3. Estado D'Arte:

#### 3.1. Materiais Piezoelétricos:

Em meados do século XVII Carolus Linnaeus e Franz Aepinus observaram que certos materiais, como cristais e algumas cerâmicas, geram cargas eléctricas aplicando uma mudanças de temperatura. Outros autores tentaram estudar este fenómeno, mas com pouco sucesso. Até que Curie et Curie. (1880), descobriram que se certos cristais fossem sujeitos a uma deformação mecânica, estes tornavam-se electricamente polarizados e que o grau de polarização era proporcional à deformação aplicada (efeito piezoelétrico directo). Contudo, os irmãos Curie não presumiram que esses mesmo materiais possuiriam também o efeito inverso, ou seja, não previram que estes se deformavam quando expostos a um campo eléctrico. Esta propriedade foi deduzida matematicamente por Lippman (1881), e posteriormente confirmada experimentalmente pelos irmãos Curie. O efeito piezoelétrico directo é aproximadamente linear, isto é, a polarização varia proporcionalmente com a tensão mecânica aplicada. Para além disso, é dependente da direcção, pelo que, tensões de compressão e de tracção levam à geração de campos eléctricos com polaridades opostas. O efeito inverso também segue o mesmo principio, uma vez que a polaridade da tensão aplicada sobre o cristal piezoelétrico determina se este tem uma variação dimensionalmente positiva ou negativa, ou seja, dilata ou comprime.

A piezoelectricidade é uma propriedade característica de alguns materiais e tem vindo a ser utilizada em transdutores electromecânicos, portanto, efeito piezoelétrico directo para sensores e o inverso para actuadores.

A piezoelectricidade pode ser encontrada em alguns materiais naturais como por exemplo, o quartzo, topázio, turmalina, sal Rochelle, ou sintéticos. Por exemplo, aplicando uma força de 2kN a um cristal de quartzo com  $1\text{cm}^3$ , pode produzir uma tensão de 12500V, Repas (2008). Os sintéticos surgiram uma vez que os naturais não são muito adequados para funcionarem como actuadores. Dentro desta classe, um dos grupos mais importantes é o dos cerâmicos, como o PZT (titanato zirconato de chumbo). Outro tipo de material piezoelétrico sintético muito utilizado é o PVDF, que é um polímero, usado sobretudo como sensor.

Um exemplo do uso de piezoelétrico é o da Perpetuum, que usa materiais piezoelétrico para converter energia de choque e vibrações em electricidade para sensores por comunicação por wireless. Essa capacidade de fornecer energia sustentável para operar uma sistema de redes wireless, pode ter interesse no sector tecnológico, pois elimina a necessidade de mudar as baterias dos equipamentos periodicamente, eliminando a necessidade de controlo humano, Bowen et al. (2014).

Como no âmbito teste trabalho foram utilizados piezoelétricos do tipo cerâmicos, dar-se-à ênfase a este tipo de materiais.

Nestes materiais, acima de uma temperatura conhecida como ponto de Curie, cada cristal possui uma estrutura centrossimétrica sem nenhum dipólo, fig. 6(1). Contudo, a temperaturas mais baixas, cada cristal passa a ter uma simetria tetraédrica e, associada a ela, um dipolo, fig. 6(2). Dipólos contíguos formam regiões alinhadas localmente, denominadas por domínios de Weiss. Este alinhamento confere um dipólo ao domínio e uma consequente polarização. A direcção da polarização entre os domínios vizinhos é aleatória e, consequentemente, o material não possui uma polarização global.

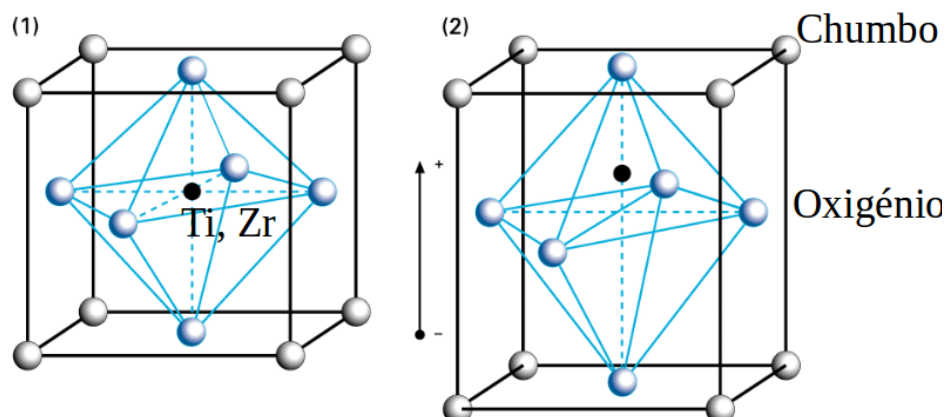


Figura 6: Estrutura cristalina de um cerâmico piezoelétrico, antes e depois da polarização, adaptado de Ledoux (2011).

Para alterar esta condição, nos materiais cerâmicos, os domínios são alinhados por exposição a um campo eléctrico muito intenso ( $>2000\text{V/mm}$ ), Thompson et al. (1992), a temperatura ligeiramente abaixo do ponto de Curie. Neste processo, conhecido por *poling*, também se alteram as dimensões do material, crescendo na direcção do campo eléctrico e encolhendo lateralmente (fenómeno que está relacionado com o coeficiente de Poisson).



Após a remoção do campo eléctrico, muitos dos domínios permanecem bloqueados, com uma orientação quase paralela à imposta anteriormente pelo campo eléctrico, não regressando à sua orientação original. Agora o material possui uma polarização global permanente, a polarização remanescente, e ficou permanentemente deformado, Ledoux (2011). A polarização é perdida se o material for sujeito a temperaturas superiores ao ponto de Curie, se o campo eléctrico aplicado for excessivo e na direcção posta ao aplicado durante o processo de *poling*, Preumont (2011), ou ainda se este for sujeito a condições mecânicas extremas.

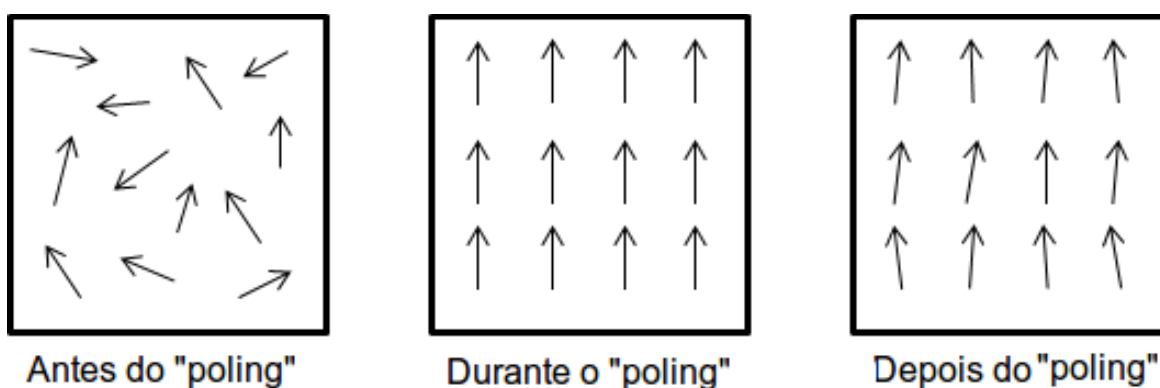
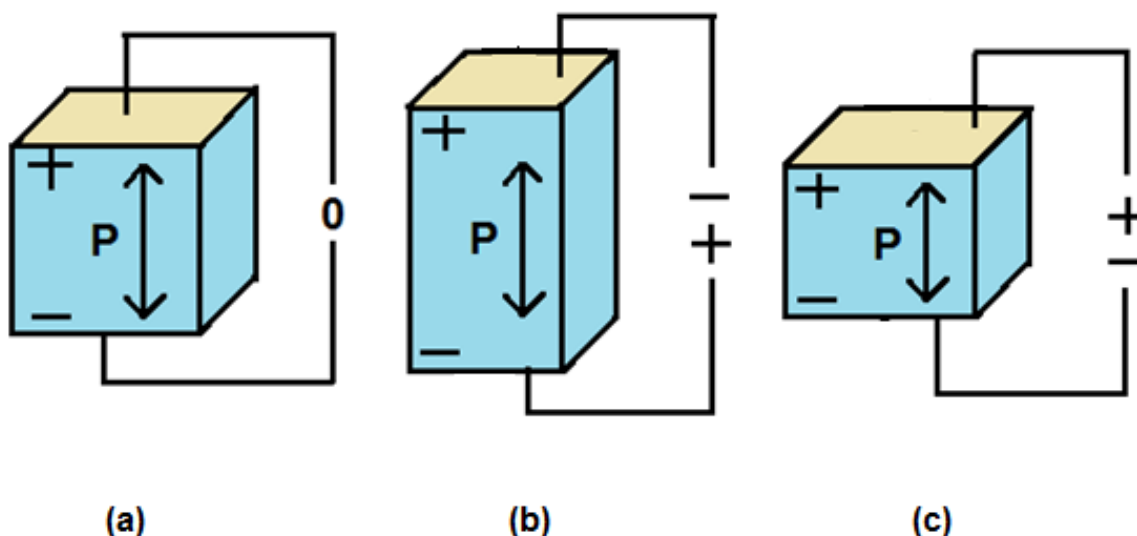


Figura 7: Método de *poling* de materiais piezoelétrico cerâmico, adaptado de Ledoux (2011).

As propriedades de um cerâmico piezoelétrico podem ser explicadas pela série de imagens na fig. 8. Uma tensão de tracção ou de compressão, aplicada a um material deste tipo, altera a distribuição dos dipólos, criando uma tensão eléctrica. Comprimir o material na direcção da polarização, ou traccionar perpendicularmente a essa direcção, gera uma tensão com a mesma polaridade da tensão aplicada durante o processo de *poling*, fig. 8(b). pelo contrario, traccionar ao longo da direcção de polarização ou comprimir numa direcção perpendicular a esta, vai gerar uma tensão com polaridade oposta à tensão aplicada durante o processo de *poling*, fig. 8(c). Este modo de operação corresponde ao modo do sensor, no qual se dá a conversão de energia mecânica em energia eléctrica. A relação entre a tensão mecânica aplicada e a tensão eléctrica gerada pode ser considerada como linear, até um certo valor de tensão mecânica que varia conforme as propriedades do material. Exemplos de geradores piezoelétricos são aqueles encontrados em isqueiros e em microfones.



*Figura 8: Reacção de um material piezoeléctrico polarizado a uma tensão aplicada, adaptado de Ledoux (2011).*

Os cerâmicos de PZT são relativamente simples de fabricar e possuem boas propriedades electromecânicas, pois geram forças ou deslocamentos comparativamente grandes com tensões aplicadas relativamente baixas, e vice-versa. Por exemplo, um piezoeléctrico de PZT gera uma tensão mensurável ao ser deformada 0,1% em relação à dimensão original, Prakash et al. (2013). Consequentemente, é dos materiais mais utilizados em transdutores deste género Preumont (2011). Outra vantagem dos materiais cerâmicos, relativamente aos cristais naturais, é o seu elevado ponto de Curie, podendo operar a temperaturas elevadas.

Os transdutores piezoeléctricos estão disponíveis em muitas formas e feitios. A forma mais utilizada é em lâminas finas, que podem ser colocadas ou embebidas nas estruturas. Estes transdutores são utilizados em muitas aplicações como, por exemplo, no controlo activo de vibrações em estruturas, Lima (2013) e Duarte (2014), ou até como sensores para medição de sinais sísmicos, Liu (2005).

Devido às suas propriedades, os materiais piezoeléctricos podem ser aplicados a uma panóplia de situações, algumas sendo:

- Ignição de isqueiros, desenvolvida por Walter Mohr em 1976, Mohr (1976), a ignição de isqueiros através de materiais piezoelétricos tornou-se numa aplicação corrente que, actualmente, é utilizada numa vasta gama de produtos.
- Gerador de energia com o movimento do utilizador, este género de dispositivos tem como fundamento o efeito piezoelétrico directo e, fazendo uso deste, aproveitam o movimento de um indivíduo para gerar alguma energia, Preston (2011).
- controlo de forma de estruturas adaptativas, esta aplicação consiste na actuação de materiais piezoelétricos com o intuito de modificar e controlar a forma de um dado componente. Estas técnicas são utilizadas em componentes leves e são de particular interesse para a indústria aeroespacial Coutu et al. (2010) e para aplicações científicas, Silva (2003).
- Equipamento desportivo, os materiais inteligentes são também aplicados em produtos desportivos com o intuito de reduzir o seu nível de vibrações. Como exemplo, existem raquetes de ténis, esquis e pranchas de *snowboard* que já aplicam estes princípios, Moheimani e Fleming (2010).
- Microscópio de corrente de tunelamento, esta invenção, que valeu o Prémio Nobel da Física de 1986 a Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, permite obter imagens de alta precisão e amplificação (utilizado, por exemplo, na obtenção de imagens de átomos e moléculas). São utilizados com esse efeito, entre outros componentes, transdutores piezoelétricos para realizar o controlo de posição, Chen (1993).
- Altifalantes, o uso do efeito piezoelétrico reverso na produção de um actuador para aplicações acústicas data do princípio de século XX, com a invenção do altifalante piezoelétrico por Lewis Chubb, Chubb (1925).
- Osciladores, os cristais piezoelétricos (particularmente os cristais de quartzo), são frequentemente utilizados para produzir uma frequência regular, o que é útil em aplicações de electrónica, como relógios electrónicos (conhecidos como relógios de quartzo) ou microcontroladores, Firth et al. (1965).
- Cirurgia, na ultimas décadas do século XX, os materiais piezoelétricos têm tido aplicação na área da medicina, permitindo a realização de cirurgias (particularmente de corte de tecido ósseo) menos invasivas e com menos riscos

para o utente através de microvibrações de alta frequência, permitindo ainda uma melhoria da visibilidade e precisão do processo, Labanca et al. (2008).

### 3.2. Dispositivos *bender* piezoeléctricos em *cantilever*:

A patilha piezoeléctrica em *cantilever* é outro dispositivo comumente usado tanto como actuador, como detector de vibrações. Como sensor que converte energia sísmica em eléctrica, este dispositivo trabalha bem em aplicações de vibração, pois ocorre um elevado stress na patilha com pouca força aplicada, Wang et al. (1998). Uma vez que materiais piezoeléctricos são quebradiços, é frequente que *benders* sejam compostos por várias camadas.

São normalmente compostos de duas camadas, uma feita de material piezoeléctrico com o fim de produção de energia eléctrica ou como actuador, e outra camada de uma material não piezoeléctrico ou substrato, que fornece rigidez e torna o dispositivo mais fiável a longo prazo, a este tipo de configuração é conhecida como uniforme, fig. 9(a), se o substrato se encontrar entre duas camadas de material piezoeléctrico, o dispositivo diz-se biforme, fig. 9(b).

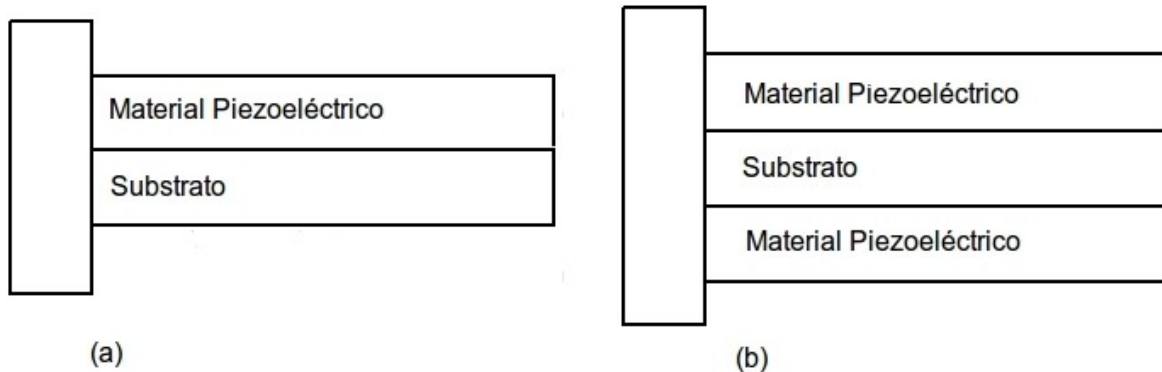


Figura 9: Beders piezoeléctricos em cantilever, (a) Uniforme, (b) biforme, adaptado de Charnegie (2007).

É relativamente simples a utilização de *benders* em *cantilever*, se uma das camadas está em compressão, a outra está em tracção. O esforço aplicado numa camada afecta sempre a outra camada, por exemplo num *bender* do tipo uniforme, quando é aplicada uma

tensão eléctrica à camada piezoeléctrica, esta expande ou contrai de acordo com a direcção do campo eléctrico aplicado enquanto que o substrato não é afectado por esse campo, isso provoca o *bender* a flectir, para cima ou para baixo tendo em conta se a camada piezoeléctrica expande ou contrai. O contrário também se observa, quando é aplicada uma força à patilha que provoca a sua flexão, que por sua vez provoca a geração de cargas entre os eléctrodos da camada piezoeléctrica. Tendo em conta que o esforço num *bender* em *cantilever* é sempre longitudinal, é só uma questão de configurar os eléctrodos no material piezoeléctrico para manipular a direcção de *poling* no interior do material. Se os eléctrodos estiverem em contacto com toda a extensão do piezoeléctrico, o campo eléctrico será sempre normal aos eléctrodos e perpendicular ao esforço aplicado no *bender*, fig. 10.

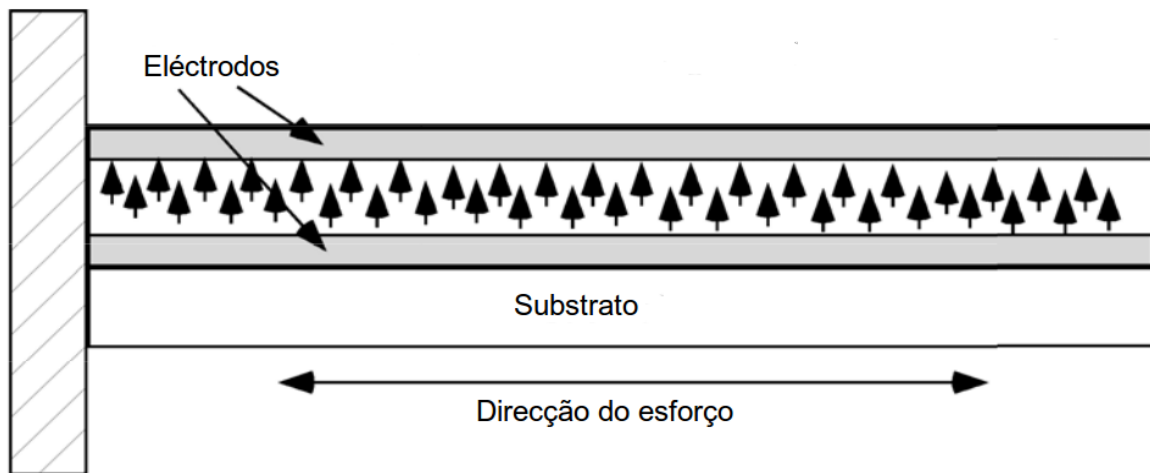


Figura 10: Esquema de um *bender* piezoeléctrico em *cantilever*, adaptado de Charnegie (2007).

No presente trabalho foram utilizados *benders* em *cantilever* do tipo biforme, para a construção dos transdutores piezoeléctricos.

### 3.3. NDT:

Herane et al. (1981) define NDT como sendo uma técnica não destrutiva aplicada no controlo de qualidade em projectos de engenharia, nomeadamente, em aeroportos, estradas e pontes. O avanço acelerado que os computadores portáteis, os algoritmos computacionais de elevado desempenho e a engenharia electrónica, observado nas ultimas décadas, tem permitido a aplicação de técnicas de sísmica nesta área. A tomografia computadorizada é umas dessas técnicas em rápido crescimento.

Convencionalmente o teste da carga estática do qual se obtém uma curva tensão-deformação é um dos ensaios mais usados em elementos de betão armado, para estimar parâmetros de elasticidade. Esta técnica é cara e demorada, então ensaios de NDT com sísmica indirectamente, de forma mais barata e mais rápida, fornecem informação da presença de fracturas, núcleos de alteração, e outras anomalias na estrutura, pelo que é de grande interesse na engenharia civil, não só na construção de grandes obras de engenharia, como pontes e barragens, mas também aplicada há reabilitação de património edificado, Petrou et al. (1996).

De modo geral, sistemas geofísicos de análise sísmica, contêm, uma fonte de energia, um ou mais receptores e um sistema de aquisição de dados.

Enquanto que, na geofísica dos petróleos são comumente usados explosivos como fonte sísmica, de forma a “iluminar” objectos até vários quilómetros de profundidade, a fonte energética para o teste de estruturas e alvenarias é bastante mais simples e humilde, um simples martelo pode ser o suficiente. Neste trabalho a fonte usada tinha uma massa aproximada de 500g. Normalmente, quanto mais leve a fonte sísmica, maior será a frequência do sinal gerado, e menor penetração, Liu et al. (2005). Em comparação, uma marreta com 10kg, tem uma frequência típica de aproximadamente 100Hz, Keiswetter et al. (1995), pode ser usada para prospecção sísmica do nível freático, e no propósito da engenharia de fundações, isto devido à maior distância entre a fonte sísmica e o geofone mais distante, podendo estar a dezenas de metros, bem maior do que a distancia entre a fonte e o transdutor usados em métodos de sísmica NDT.

A energia propaga-se radialmente da fonte sísmica, e é recebida pelos geofones.

Geofones típicos têm frequências intrínsecas que variam desde dezenas a centenas de Hertz, Liu et al. (2005). Os transdutores usados em NDT respondem a frequências bem mais elevadas. A resolução da imagem é aproximadamente metade do comprimento de onda ( $\lambda$ ), que por sua vez é a velocidade de propagação ( $v$ ) a dividir pela frequência ( $f$ ) do sinal:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (26)$$

Se por exemplo a velocidade de propagação a onda P for de 3000 a 5000m/s uma frequência adequada seria na ordem dos kHz, obtendo-se a resolução adequada no estudo de alvenarias e outras obras de engenharia civil. Assim, uma fonte de curto pulso, como um NDT ultra sónico é ideal para se obter frequências mais altas.

O sistema de aquisição de dados ou simplesmente DAQ tem um papel importantíssimo nos estudos NDT, pois é responsável pela conversão do sinal digital em analógico e transferir esses dados para o computador ou outra ferramenta de armazenagem de dados digitais (memórias flash, discos rígidos, ect.), um exemplo desses sistemas é o MEDA-3B, ver fig. 11.

O MEDA-3B é um instrumento multi-canal, digital, controlado por computador para a aquisição de dados de NDT-sismicos. Tendo em conta o objectivo do estudo, este instrumento pode ser usado como mono-canal ou multi-canal, com um máximo de 16 canais. Tem uma frequência de amostragem máxima de 1MS/s num canal. A frequência de amostragem é inversamente proporcional ao numero de canais ligados. Tipicamente os instrumentos do tipo DAQ são identificados com a frequência máxima de amostragem possível. Tipicamente em técnicas de tomografia é definida uma taxa de amostragem de 100kHz, Liu et al. (2005).

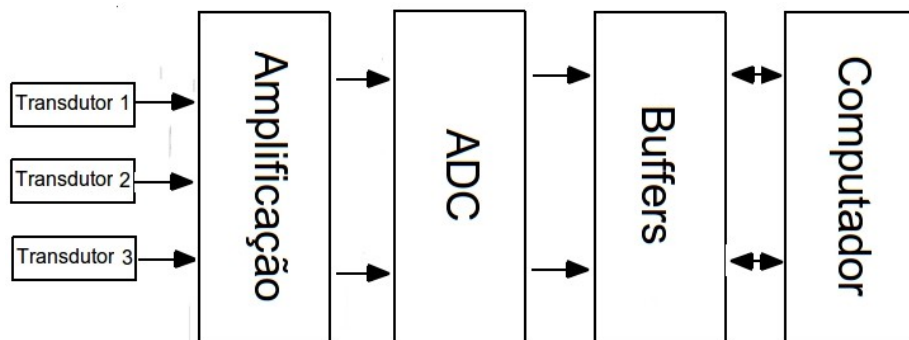


Figura 11: Bloco-Diagrama do sistema de aquisição de dados sísmicos MEDA-3B, adaptado de Liu et al., (2005)

Habitualmente os sensores utilizados em NDT para converter a energia sísmica em corrente eléctrica, são transdutores de cristais piezoeléctricos. Estes sensores usam o efeito piezoeléctrico para medir mudanças de aceleração, pela conversão do movimento em carga eléctrica.

Um desses transdutores disponível comercialmente é o SYD-II, fig. 12, tem um frequência de ressonância intrínseca de 3,4kHz, com um erro de  $\pm 0,2\text{Hz}$ . A sua sensibilidade é de 54,6 mV por aceleração gravítica (g), mV/g, com  $g=9,8\text{ ms}^{-2}$ . A consistência da sensibilidade e polaridade do transdutor de cristais piezoeléctricos são testados e demonstrados experimentalmente.

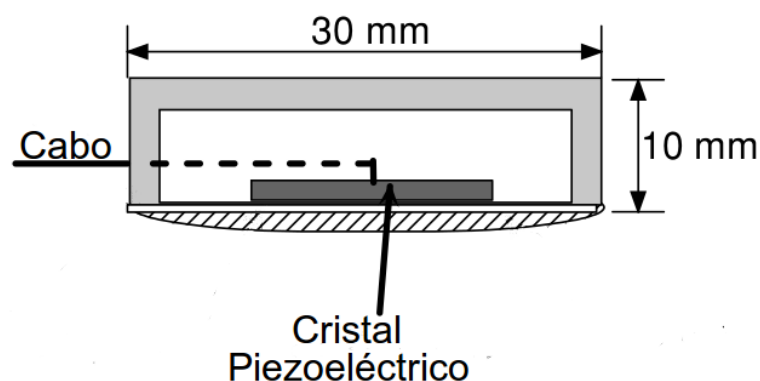


Figura 12: Diagrama esquemático de um transdutor de cristal piezoeléctrico do tipo SYD-II, adaptado de Liu et al. (2005)



Estes métodos de ensaios não destrutivo, são de forma geral acompanhados por tomografia sísmica, esta técnica foi inventada na engenharia biomédica e mais tarde aplicada à geofísica para fazer o retrato interno da terra ou de estruturas construídas. É feito um retrato das velocidades sísmicas e da atenuação e então correlacionadas com propriedades relacionadas directamente com condições físicas.

A velocidade sísmica é estabelecida pelas propriedades elásticas e e pela densidade, e a atenuação é fixada por propriedades inelásticas no meio.

### 3.4. Arduino:

Neste trabalho foi utilizado uma placa do tipo Arduino, fig. 13, pois sendo um sistema de *hardware* livre, pouco dispendioso e com uma grande comunidade *online* se torna numa base de desenvolvimento vantajosa em relação a outros sistemas existentes no mercado.

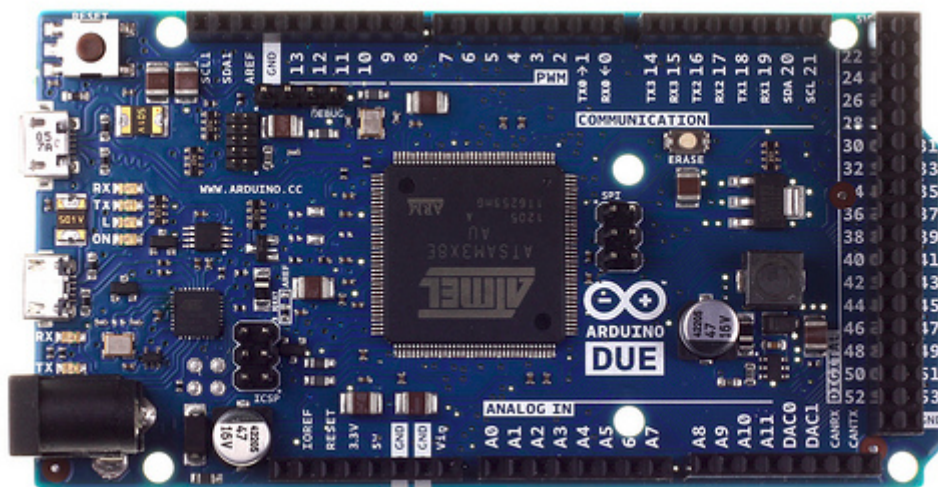


Figura 13: Arduino Due

Arduino é uma plataforma de prototipagem electrónica de hardware livre, Arduino (2016), e de fácil utilização tanto de software como de hardware. As placas Arduino são capazes de ler entradas digitais, botão do tipo “push-button”, ou até uma mensagem do Twitter, e analógicas, como sensores de luz (LDR), acelerómetros, geofones, ou

transdutores de piezoeléctrico, ou saídas digitais que podem ser activadas para controlar uma lâmpada LED ou até um motor eléctrico. É construído com base num microcontrolador Atmel AVR, a linguagem de programação padrão tem origem em “Wiring” e é essencialmente C/C++, que é compilada para linguagem de máquina através de um software Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE-Arduino).

Inicialmente, começou-se por trabalhar com um Arduino Uno R3, mas rapidamente se percebeu que as suas características seriam limitativas para o cumprir o objectivo deste trabalho, na tabela 2 faz-se a comparação de algumas características destas placas. Mais tarde optou-se por utilizar um Arduino Due, e foi com esse que se realizou todo o trabalho.

*Tabela 1: Comparação entre Arduino Uno e Due, Atmel (2015(a)) e Atmel (2015(b)) .*

<b>Características</b>	<b>Arduino Due</b>	<b>Arduino Uno</b>
Microcontrolador	AT91SAM3X8E	ATmega328-UP
Tensão de Funcionamento (V)	3,3	5
Entradas e saídas digitais	54 (em que 12 produzem PWM output)	14 (em que 6 Produzem PMW output)
Entradas analógicas	12 (ADC) 12 bits	6 (ADC) 10 bits
Saídas analógicas	2 (DAC)	N.A
Memoria Flash (kB)	512	32
Memoria SRAM (kB)	96	2
Velocidade de Clock (MHz)	84	16

Como se pode verificar, Arduino Due é essencialmente mais rápido, e mais completo. O microcontrolador SAM3X8E do Due possui arquitectura Cortex-M3, que é concebida para que os seus registos sejam de 32 bits e que operações de 4 bytes sejam feitas por cada ciclo de relógio, Atmel (2015(b)). Por outro lado, os microcontroladores ATMEG possuem uma arquitectura interna de apenas 8 bits, Atmel (2015(a)). Além disso, o Arduino Due pode operar até 84 MHz, que é 5,25 vezes mais rápido do que o Arduino Uno.

Os conversores analógico-digital (ADC) do Due são substancialmente mais rápidos e podem operar até 1MHz de taxa de amostragem. Possui 12 entradas ADC, e todas elas com 12 bits de resolução, que proporcionam uma resolução de 0,8mV, ou seja, 4096 ordens de grandeza ( $2^{12}$ ) a dividir pela amplitude de tensão (0 a 3,3V).

A placa possui duas portas USB, uma para transferir o programa (programming port), tal como no Arduino Uno, e outra denominada por “nativa”, que pode operar como “host” ou “On-The-Go”, para conectar hardware externo, como um rato usb, teclado ou smartphone. Possui também 4 UARTs (portas de serie), 2 TWI (uma espécie de “I<sup>2</sup>C da ATMEL”, um pouco modificada), um barramento SPI (Serial Programming Interface), para comunicações seriais de alta velocidade, e CAN (Conttroller Area Network), um tipo de ligação muito utilizada no sector automóvel.

Levando em consideração o que está supracitado, pode concluir-se que, para as tarefas de captura e retenção (buffers) de sinais, a placa Arduino Due é mais adequada, precisa e rápida.

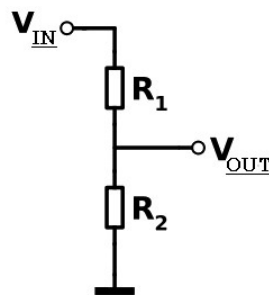


## 4. Materiais e Métodos:

### 4.1. Instrumentação:

Neste trabalho foi utilizada um Arduino Due como equipamento de controlo e aquisição de dados. A placa Arduino já tem integrado um conversor de sinal analógico em digital de 12 canais e 12 bits de referencia, ou seja, a leitura do sinal é feita em relação ao zero (ground), o que implica que só lê a parte positiva do sinal diferencial, a parte negativa é portanto truncada a zero. Assim sendo teve de ser adicionado um circuito para criar um *offset* ao sinal, ou seja, o sensor é alimentado com uma tensão, metade da tensão de funcionamento do Arduino, neste caso 1,65V. Para isso teve de criar-se um divisor de tensão.

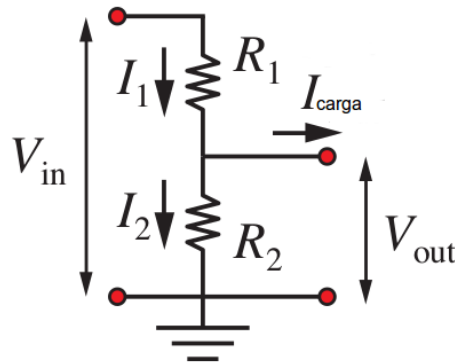
Um circuito divisor de tensão ou um potenciômetro são elementos de circuito passivo que proporciona uma forma simples de converter uma tensão DC mais elevada, numa outra tensão DC inferior, Recktenwald (2012). A fig. 14, mostra um circuito divisor de tensão, em que  $V_{in}$  é a tensão aplicada ao circuito, e  $V_{out}$  é a tensão saída do circuito, inferior à tensão  $V_{in}$ ,  $R_1$  e  $R_2$ , são respectivamente as resistências um e dois.



*Figura 14: Esquema eléctrico de um divisor de tensão, adaptado de Recktenwald (2012).*

Um divisor de tensão consiste num circuito com duas resistências em série, com uma derivação de tensão entre essas resistências. Na fig. 14 observa-se que para a tensão  $V_{in}$  aplicada através das resistências  $R_1$  e  $R_2$ , a Tensão de saída  $V_{out}$ , é a queda de tensão em  $R_1$ . Pela primeira lei de Kirchhoff, a soma das correntes em  $R_1$  e  $R_2$ , tem de ser a mesma que a corrente de carga, fig. 15, G. Kirchhoff (1857). Divisores de tensão são componentes

passivos no sentido de que transformam uma tensão  $V_{in}$  numa tensão  $V_{out}$ , sem uma fonte separada de tensão. Aplicando a lei dos nodos de Kirchhoff e a lei de Ohm, pode ser obtida uma formula simples para calcular a tensão de saída, ou no caso deste trabalho as resistências, visto que se sabe as tensões aplicada e de saída do circuito.



*Figura 15: Esquema do fluxo das correntes num divisor de tensão, adaptado de Recktenwald (2012).*

A corrente de saída de um divisor de tensão é denominada de corrente de carga,  $I_{carga}$ . Aplicando a lei de corrente de Kirchhoff, no nodo entre as resistências  $R_1$  e  $R_2$ :

$$I_1 = I_{carga} + I_2 \quad (27)$$

Onde  $I_1$  e  $I_2$  são as correntes nas resistências  $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente. Aplicando agora a lei de Ohm, em que:

$$V = R \times I \quad (28)$$

em combinação com  $R_1$  e  $R_2$  e corrente comum  $I$ , ( $I_1 + I_2$ ):

$$V_{in} = I(R_1 + R_2) \quad (29)$$

Resolvendo em ordem a I:

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \quad (30)$$

Aplicando agora a lei de Ohm a  $R_2$ :

$$V_{out} = IR_2 \quad (31)$$

Combinando as equações anteriores para eliminar I:

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (32)$$

Esta equação é normalmente aplicada de forma a calcular  $V_{out}$ , no entanto tendo em conta a aplicação do divisor de tensão neste circuito, esta equação é então resolvida em ordem a  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{V_{in}}{V_{out}} R_2 + R_2 \quad (33)$$

Assim sabendo as tensões  $V_{in}$  (3,3V) e  $V_{out}$  (1,65V) e a resistência de  $R_2$  (10k $\Omega$ ), pode calcular-se um valor para a resistência  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{3,3}{1,65} 10\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega = 10\text{ k} \quad (34)$$

Assim obtém-se que  $R_1$  tem de ter uma resistência de 10k $\Omega$

Este circuito pode ser usado como *offset* para todos os canais, no entanto, aquando dos primeiros testes do ADC, deparou-se com um problema, os sensores não podem ser ligados

uns aos outros sem nenhum tipo de protecção, então decidiu-se utilizar amplificadores operacionais (Op-Amps).

Um Op-Amp é fundamentalmente um amplificador de tensão, construído para usar o *feedback* de componentes electrónicos tal como resistências e condensadores, entre os terminais de saída (Output) e de entrada (Input). Esses componentes de *feedback* determinam o resultado da função de amplificação, por virtude de diferentes configurações tanto de resistividade como capacitivas ou ambas, o amplificador pode executar uma panóplia de operações, dando origem ao seu nome “Amplificador Operacional”, Mancini (2002).

No caso deste trabalho o fundamento do Op-Amp é de criar um escudo entre os vários sensores, de forma a que a variação da tensão criada pelo sensor não provoque variação na tensão fornecida ao sensor seguinte, ou seja, a variação na tensão no Output do Op-Amp, não provoca variação na tensão de entrada, onde estão ligados os Op-Amps seguintes, fig. 16.

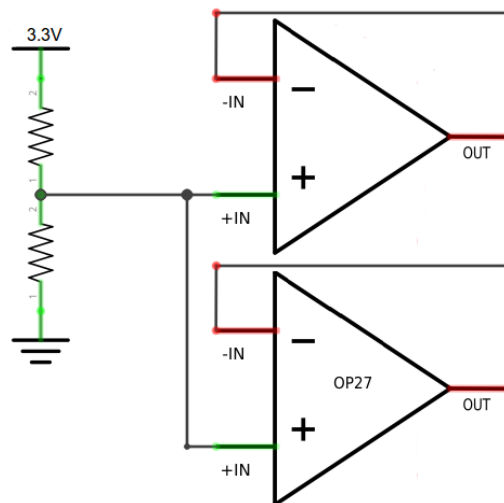


Figura 16: Esquema da ligação dos Op-Amps ao divisor de tensão no Input, imagem obtida por Fritzing.

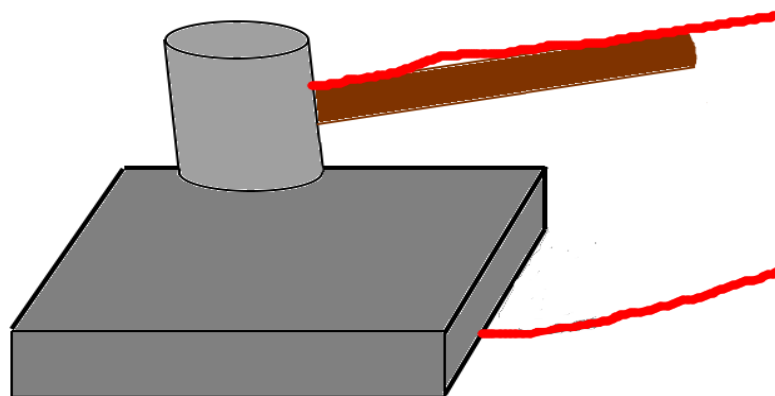
O esquema da fig. 16 mostra dois Op-Amps ligados ao mesmo divisor de tensão, o Output (OUT) dos Op-Amps está ligado ao negativo dos sensores, desta forma, o sinal diferencial fornecido pelo sensor é convertido para sinal de referencia, ou seja, quando o sinal do sensor é zero, o Op-Amp fornece uma tensão de 1,65V criando assim o offset.



Quando o sinal é positivo, é somado aos 1,65V e quando o sinal é negativo é subtraído aos 1,65V fornecidos ao sensor. Isto acontece quando o sinal é inferior ou igual a 1,65V ou superior a -1,65V, cuja a soma com a tensão do Output do Op-Amps é 3,3V, caso o sinal seja superior a 1,65V ou inferior a -1,65V esse sinal é truncado ao valor de 3,3V ou 0V, respectivamente.

O *Output* do Op-Amp é ligado ao terminal negativo (marcado -) do sensor, para evitar que seja alimentado com demasiada corrente, e por consequente alterar o sinal, ou até mesmo danificar o sensor, seja este, um geofone ou um transdutor piezoelétrico, é colocada uma resistência em série com o sensor. Neste caso foi usada uma resistência de  $22k\Omega$ , aplicando a lei de Ohm, sabe-se que a corrente através da resistência e consequentemente no sensor de 0,075 mA.

Para que o equipamento inicie a conversão e armazenamento dos sinais sísmicos, é necessário um sistema de disparo, em que dois condutores metálicos contactam aquando do impacto. A fig. 17 mostra um sistema simples de disparo, de um martelo condutor, que insidie sobre uma placa metálica condutora, ambos os objectos estão ligados por fio condutor de electricidade ao Arduino, aquando do impacto, o circuito eléctrico é fechado e é dado um sinal positivo ao canal digital do Arduino, a rotina que está nesta placa começa a leitura dos sinais sísmicos quando esse sinal é recebido.



*Figura 17: Esquema de uma fonte sísmica (martelo + base) com disparo por contacto.*

Outro sistema de disparo funciona através de um piezoeléctrico, que pode estar colocado tanto na base como no próprio martelo, o funcionamento electrónico é exactamente o mesmo ao sistema de fecho de circuito, em que o sinal gerado imediatamente pelo piezoeléctrico é lido num canal digital, e consequentemente, o Arduino inicia a leitura dos sinais sísmicos.

A fig. 18 mostra as ligações em *protoboard* do Arduino e o circuito corroborante para a aquisição. No Anexo 1 encontra-se o mesmo esquema em formato esquemático.

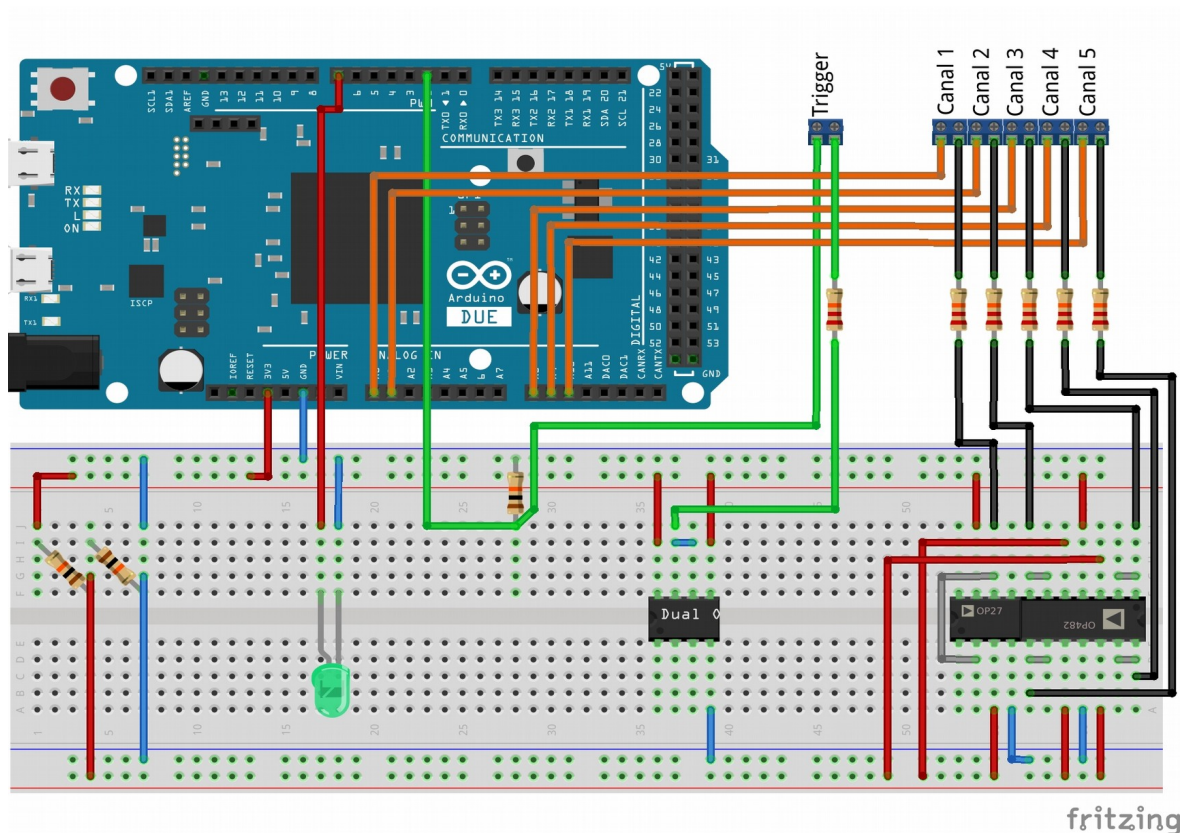


Figura 18: Esquema do Arduino e do circuito corroborante, obtida por Fritzing.

#### 4.2. Transdutor piezoeléctrico:

Construíram-se também sensores para aquisição de dados sísmicos. Estes são dispositivos do tipo *bender* piezoeléctrico em *cantilever*.

Para isso utilizaram-se patilhas piezoeléctricas com 2 mm de largura por 1 mm de espessura e 1,5 cm de comprimento, montadas dentro de um tubo de cobre, apoiadas apenas num extremo, o mesmo onde estão ligados os eléctrodos de tensão. Na maioria dos dispositivos *bender* em *cantilever* estes estão equipados de um peso na sua extremidade livre, ora, para que estes respondam a maiores frequências não foram colocados pesos na sua extremidade, a fig. 19 mostra de forma esquemática os piezoeléctricos usados, em montagem em *cantilever*.



*Figura 19: Esquema de um bender piezoeléctrico do tipo biforme em cantilever. A vermelho estão representados os eléctrodos.*

A fig. 20, mostra o transdutor piezoelétrico depois de construído.



*Figura 20: Dispositivo bender piezoelétrico em cantilever construído para efeito neste projecto.*

O acoplamento é feito usando massa adesiva removível UHU Patafix, devido à reduzida massa de cada transdutor esta massa é suficiente para criar o acoplamento mesmo em superfícies verticais, ou no caso do estudo da viga de betão armado, colados na parte inferior do objecto, (ver fig. 23).

#### **4.3. Software:**

##### **4.3.1. GNU Octave:**

Ou simplesmente Octave, é uma linguagem computacional desenvolvida para computação matemática. Possui uma interface em linha de comando para resolução de problemas matemáticos. Faz parte do projecto GNU, é um software livre sob os termos da licença GPL. Possui compatibilidade com MATLAB™ e foi desenvolvido por John W. Eaton, Eaton 1998.

O GNU Octave conta com iteração através de uma linguagem de programação de alto nível, programada inicialmente para cálculo numérico. Fornece uma linha de comando conveniente resolvendo problemas lineares e não-lineares numericamente, e executando outras tarefas numéricas usando uma linguagem que é bastante compatível com o MATLAB™, Eaton (2016), fig. 21.

Possui ferramentas extensivas para a resolução de problemas lineares numéricos comuns de álgebra, cálculo aproximado de raízes de equações não lineares, funções

ordinárias, polinómios, cálculo de integrais, e integração numérica de equações diferenciais ordinárias e diferenciais algébricas, Eaton (2016).

Por ser software livre e ter compatibilidade com MATLAB™, este software foi usado para computação matemática dos dados obtidos durante os ensaios neste projecto.

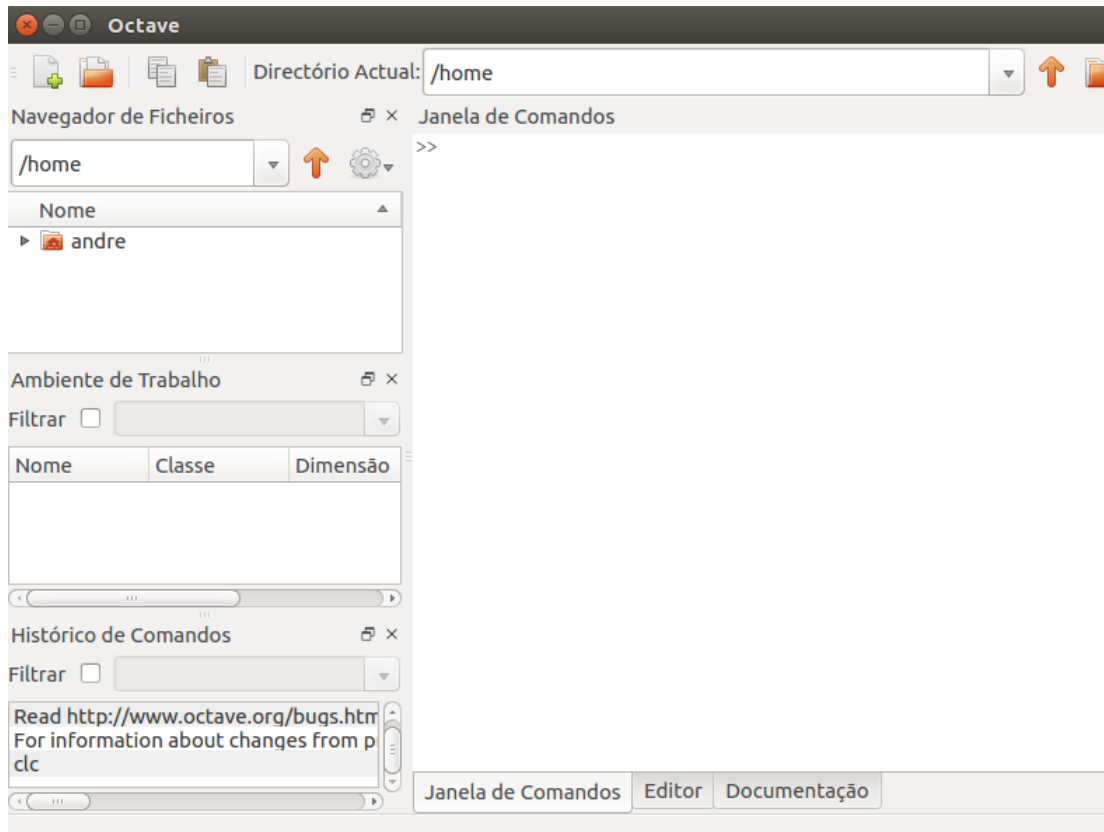


Figura 21: Painel principal do software de cálculo computacional GNU Octave, Versão 4.2.0.

#### 4.3.2. SeismicPanel:

Neste trabalho foi empregue o *SeismicPanel* como software de tomografia de tempos sísmicos.

Este software converte os tempos de chegada das ondas sísmicas em velocidades de propagação, tendo em conta a geometria do problema. Assim ao combinar as análises de todos os dados obtidos, constrói-se um mapa das velocidades de propagação sísmica numa secção bidimensional ou tridimensional, conforme a campanha sísmica efectuada.

É constituído de 3 módulos: *mesh design*, *forward modeling*, e inversão.

No módulo de *mesh design*, tem como função concretização do espaço e modelo de velocidades inicial obtido por uma hipérbole de velocidades. No módulo *forward modeling*, fornece a capacidade para fazer rastreamento tanto raios directos como curvos, obtendo-se o tempo de chegada da primeira onda. Antes de executar o *forward modeling*, o utilizador deverá configurar a geometria da aquisição ou carregar a geometria do ficheiro de dados adquiridos.

No método utilizado para rastreamento por raios curvos por este software, tem por base a equação Eikonal de duas dimensões é resolvida para um campo escalar de tempos e aplicado o método de diferença finita para aproximar os gradientes de tempos para calcular o *raypath* do receptor de volta à fonte, Boonyasiriwat (2006), fig. 22.

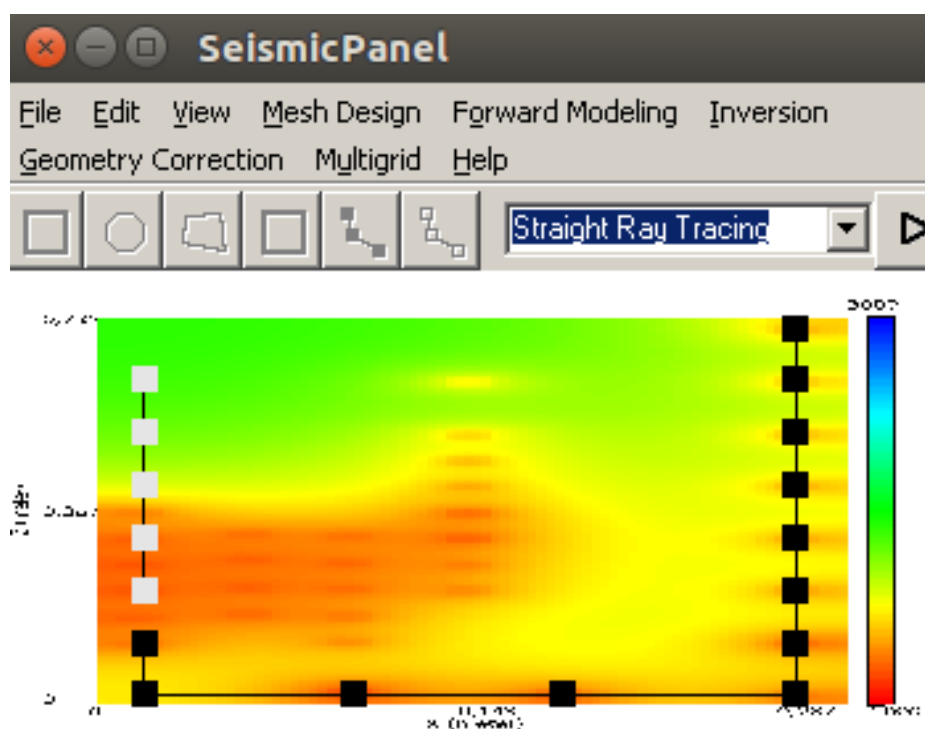


Figura 22: Paineil principal do Software de tomografia sísmica, *SeismicPanel*.

## 5. Discussão de Resultados:

### 5.1. Geometria do ensaios:

Uma vez que a instrumentação de aquisição estava operacional, esta foi testada em três elementos de alvenarias distintas entre si, tanto a nível material, como de tamanho e forma.

A baixo descrevem-se as geometrias usadas na distribuição das fontes e transdutores e os sinais obtidos.

#### 5.1.1. Viga de Betão Armado:

O primeiro ensaio aqui tratado, foi efectuado numa viga de betão armado, na estrutura exterior do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

O objectivo deste ensaio foi determinar a velocidade das ondas sísmicas no interior do betão e identificar anomalias estruturais presentes.

Começou-se por definir a geometria da aquisição. Para isso teve-se em conta a espessura (distância entre as fontes sísmicas e os transdutores) e a malha de aquisição para ter a máxima resolução possível.



*Figura 23: Vista inferior da viga e dos transdutores colados.*



Então transdutores foram acoplados na parte inferior da viga, ver fig. 23, usando massa adesiva removível, com um espaçamento de 0,05m. Os tiros sísmicos (fontes das ondas sísmicas) foram dados na parte superior da viga, com um espaçamento de 0,03m, a fonte sísmica usada foi um martelo de massa aproximada de 500g. Neste ensaio foram usados 10 transdutores e feitos 30 tiros. A fig. 24, mostra o esquema da geometria adoptada.



*Figura 24: Esquema da geometria de aquisição da viga de betão armado. A verde estão representados os locais dos tiros e a vermelho os locais onde os transdutores foram acoplados, imagem não à escala.*

Durante a aquisição optou-se por fazer um *stack* de 10 tiros para maximizar o rácio sinal-ruído, obtendo desta forma um sinal mais limpo.

A fig. 25 mostra a vista superior dos locais de tiro.



*Figura 25: Vista superior da viga, presentes: a fita métrica, a fonte sísmica (martelo) e o trigger (conjunto martelo/conductor eléctrico).*



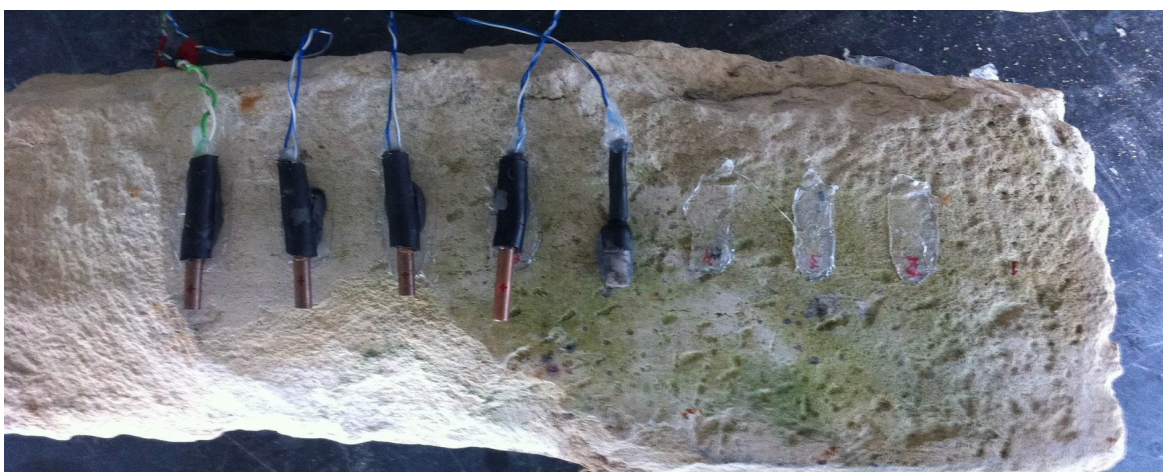
No local em que foi efectuada a aquisição, a viga apresentava uma fractura bastante visível, fractura essa que como se verá mais a diante, afectou o sinal sísmico registado, ver fig. 25.

### 5.1.2. Bloco de Alvenaria em Calcário:

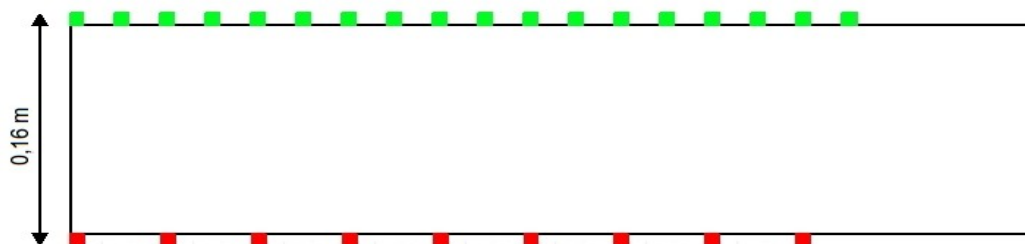
Outro ensaio aqui tratado foi efectuado num bloco de alvenaria solta em calcário. Aqui o objectivo foi determinar a velocidade das ondas sísmicas dentro da rocha e verificar possíveis patologias através de diferenças de velocidade, com recurso a tomografia sísmica.

Não é possível determinar a história deste elemento estrutural, pois este foi recolhido na ria de Aveiro nas proximidades da universidade, mais concretamente na rua da Pega, presume-se que tenha sido ali depositado como aterro ou forma de enchimento para a construção de uma barreira entre salinas e que tenha sido parte do rejeitado de uma possível demolição.

Começou-se por definir a geometria da aquisição. Para isso teve-se em conta a espessura (distância entre as fontes sísmicas e os transdutores) e a malha de aquisição para ter a máxima resolução possível, tendo sempre em conta a dimensão da amostra.



*Figura 26: Disposição dos transdutores na lateral da alvenaria em calcário.*

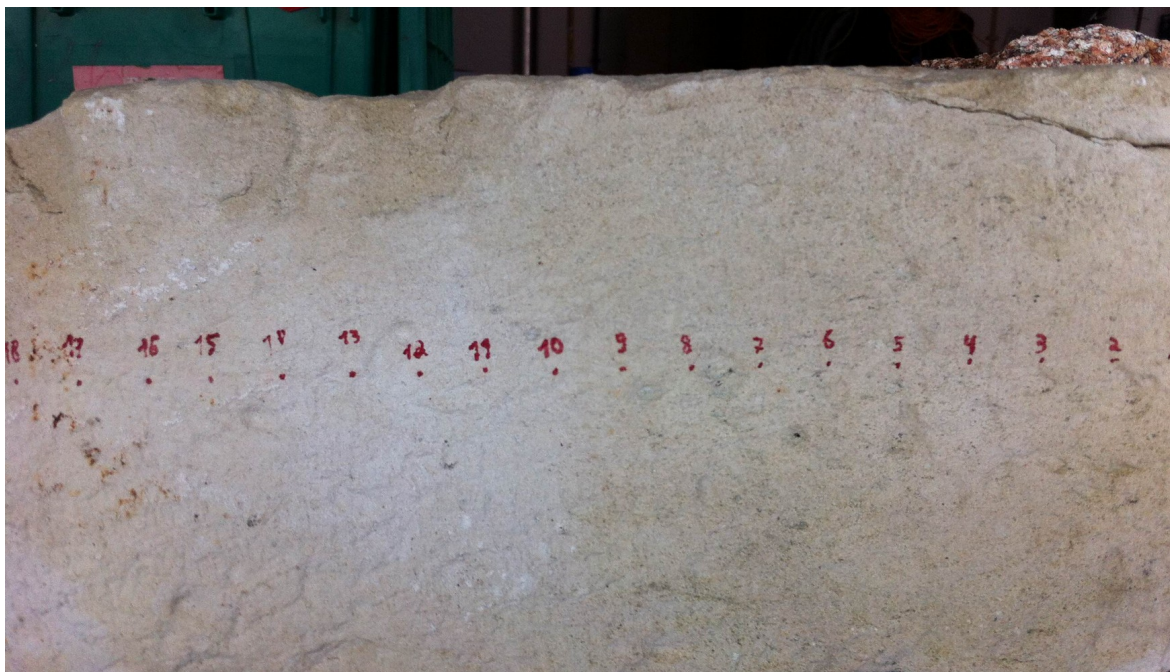


*Figura 27: Esquema da geometria de aquisição no bloco de alvenaria em calcário. A verde estão representados os locais dos tiros e a vermelho os locais onde os transdutores foram acoplados, imagem não à escala.*

Os transdutores foram acoplados na superfície lateral da alvenaria, ver fig. 26, usando massa adesiva removível, com um espaçamento de 0,03m. Os tiros sísmicos (fontes das ondas sísmicas) foram dados na lateral oposta com um espaçamento de 0,015m, a fonte sísmica usada foi um martelo de massa aproximada de 500g. Neste ensaio foram usados 9 transdutores e feitos 18 tiros. A fig. 27, mostra o esquema da geometria adoptada.

É de notar que não se dispunha de mais do que 5 canais, pelo que a aquisição teve de ser feita em duas etapas (tanto na viga em betão como na alvenaria), com os transdutores acoplados nos locais de 1 a 5, e posteriormente depois de dados os tiros correspondentes para cada caso, os transdutores foram movidos dos locais 1 a 5 para 6 até ao limite definido na primeira fase de estudo da geometria aplicável (10 para a viga e 9 para a alvenaria em calcário), a seguir a esse passo, foram efectuados novamente todos os tiros nos mesmos locais. Desta forma cria-se a ilusão da existência de um maior numero de canais.

A fig. 28 mostra a geometria das fontes com os locais de tiro numerados e marcados a vermelho.



*Figura 28: Vista lateral do bloco de alvenaria em calcário, a vermelho está a numeração dos locais de tiro, estes encontram-se exactamente opostos aos transdutores.*



### 5.1.3. Bloco de Alvenaria em Granito:

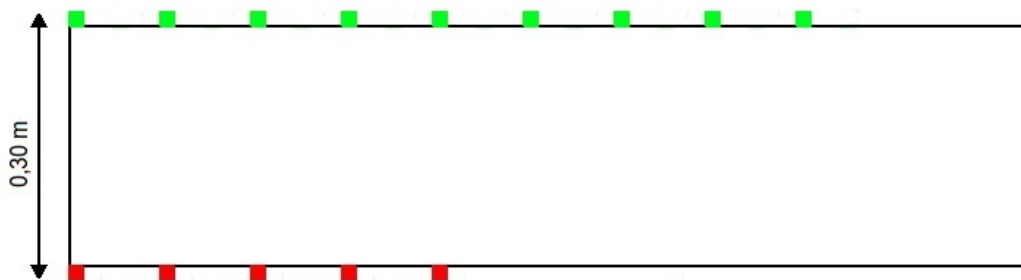
O ultimo ensaio foi feito num bloco solto de alvenaria em granito, presente no interior do Mosteiro de Leça do Balio.



*Figura 29: Bloco de alvenaria em granito no qual se efectuou o ensaio sísmico, é de notar a escritura: “Cruz singela 1288”.*

Depois de escolhido o bloco no qual efectuar o ensaio, definiu-se a geometria da aquisição. Para isso teve-se em conta a espessura (distância entre as fontes sísmicas e os transdutores) e a malha de aquisição para ter a máxima resolução possível, tendo sempre em conta a dimensão da amostra.

Os transdutores foram acoplados na superfície lateral do bloco de alvenaria, ver fig. 29, usando massa adesiva removível, com um espaçamento de 0,05m. Os tiros sísmicos (fontes das ondas sísmicas) foram dados na lateral oposta com um espaçamento de 0,05m, a fonte sísmica usada foi um martelo de massa aproximada de 500g. Neste ensaio foram usados 5 transdutores e feitos 9 tiros. A fig. 30, mostra o esquema da geometria adoptada.



*Figura 30: Esquema da geometria de aquisição do bloco de alvenaria em granito. A verde estão representados os locais dos tiros e a vermelho os locais onde os transdutores foram acoplados, imagem não à escala.*

## 5.2. Aquisição e Stack:

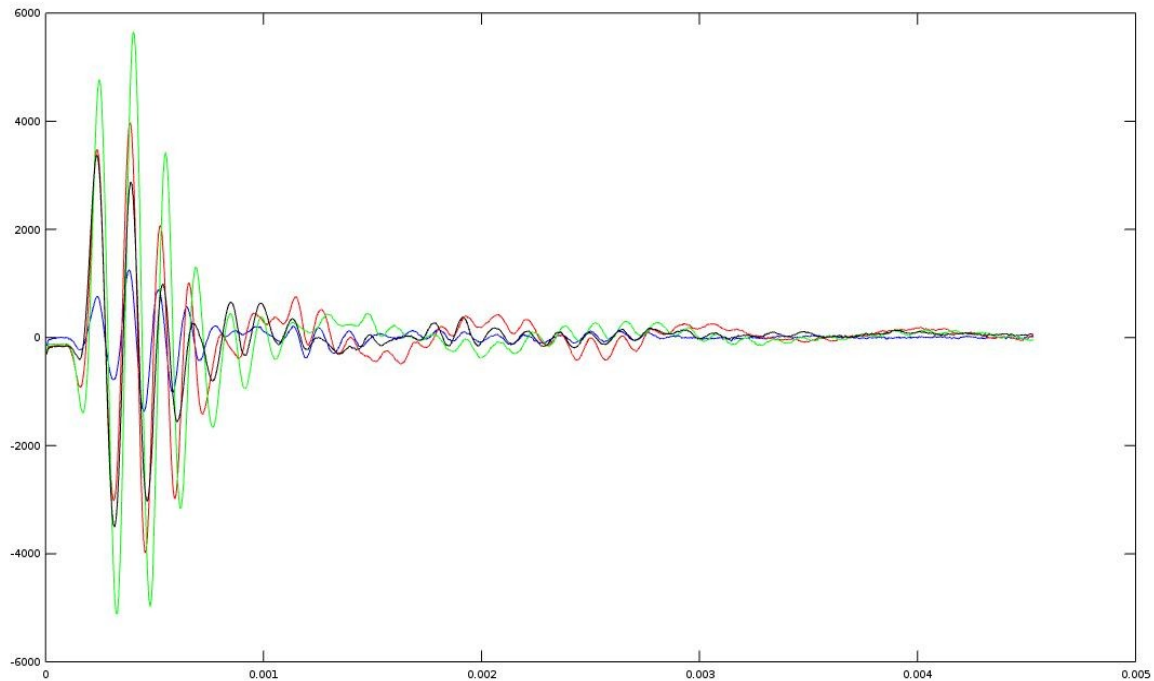
Os dados são portanto guardados num computador com o uso de um software de log que se conecta ao Arduino por ligação via serial. É então criado um ficheiro com extensão .dat de dados. Este procedimento é feito para cada local de tiro ao fim dos 10 *stacks* inicialmente predefinidos. Ou seja, ao fim da aquisição é formado um ficheiro para cada *stack* de tiros.

Nestes ensaios, foi usada a taxa de amostragem máxima do ADC do Arduino para 5 canais que é aproximadamente 166kHz, e foram recolhidas um total de mil amostras por tiro, é definido no *Sketch* (rotina) do Arduino 5 colunas de dados uma para cada canal, mais uma sexta coluna com o tempo decorrido durante a aquisição das 5 amostras momentâneas dos 5 canais, ver Anexo 2. Portanto no final da aquisição cada ficheiro tem 6 colunas e dez mil linhas, mil por tiro em dez tiros para *stack*.

Uma vez efectuados os ensaios de campo, é feito o *stack* dos dados através de rotinas de Octave/MATLAB™, o Anexo 3 é um exemplo de uma rotina para esse efeito e é a rotina utilizada neste trabalho. No fim de *stack* a rotina grava um ficheiro novo com a soma dos vários tiros.

O *stack* é feito criando uma variável para cada mil linhas do ficheiro inicial, representando portanto cada tiro, e seguidamente faz a soma das várias variáveis criadas (no caso destes ensaios são criadas dez variáveis).

A fig. 31 mostra um exemplo dos dados obtidos após o *stack*.



*Figura 31: Exemplo dos dados obtidos após o stacking, dados obtidos na viga de betão armado, escala vertical em mV (nota que é um stack de 10x, pelo que o valor real de tensão será uma divisão por 10) escala horizontal em segundos, GNU Octave 4.0.0.*

Na fig. 31 são claramente visíveis as chegadas da primeira onda sísmica para cada um dos 5 canais. Nesta figura é notória a existência de uma alta frequência aproximadamente 7kHz, que poderá esta associada à frequência própria de oscilação dos *benders* em *catilever* ou fenómenos de ressonância.

Como mencionado anteriormente só se dispunha de 5 canais, pelo que foi necessário criar uma rotina em Octave/MATLAB™ para construção de um ficheiro com os nove ou dez canais (para o bloco de alvenaria em calcário e para o viga em betão armado,

respectivamente). Essa rotina faz o *stack* das aquisições e junta dois ficheiros num só, por fim guarda os dados num ficheiro final da aquisição, Anexo 4.

### 5.3. Tomografia por Tempo de Transiluminação e Velocidade Sísmica:

Como discutido anteriormente uma das técnicas optadas para interpretação das velocidades das ondas sísmicas por tomografia por tempo de transiluminação, neste método começa-se por marcar o tempo das primeiras chegadas (*picking*) durante o processo de *picking* é obtida uma velocidade inicial auxiliada pela hipérbole para meio homogéneo ajustada e cria-se então um ficheiro com a geometria e tempos obtidos a partir do *picking*. Uma vez feito este processo, prossegue-se à utilização do software *SeismicPanel*.

Depois do *stack* e da junção dos ficheiros, foi feito o *picking* das primeiras chegadas com recurso a uma ferramenta existente tanto em MATLAB<sup>TM</sup> como em Octave, o `ginput()`.

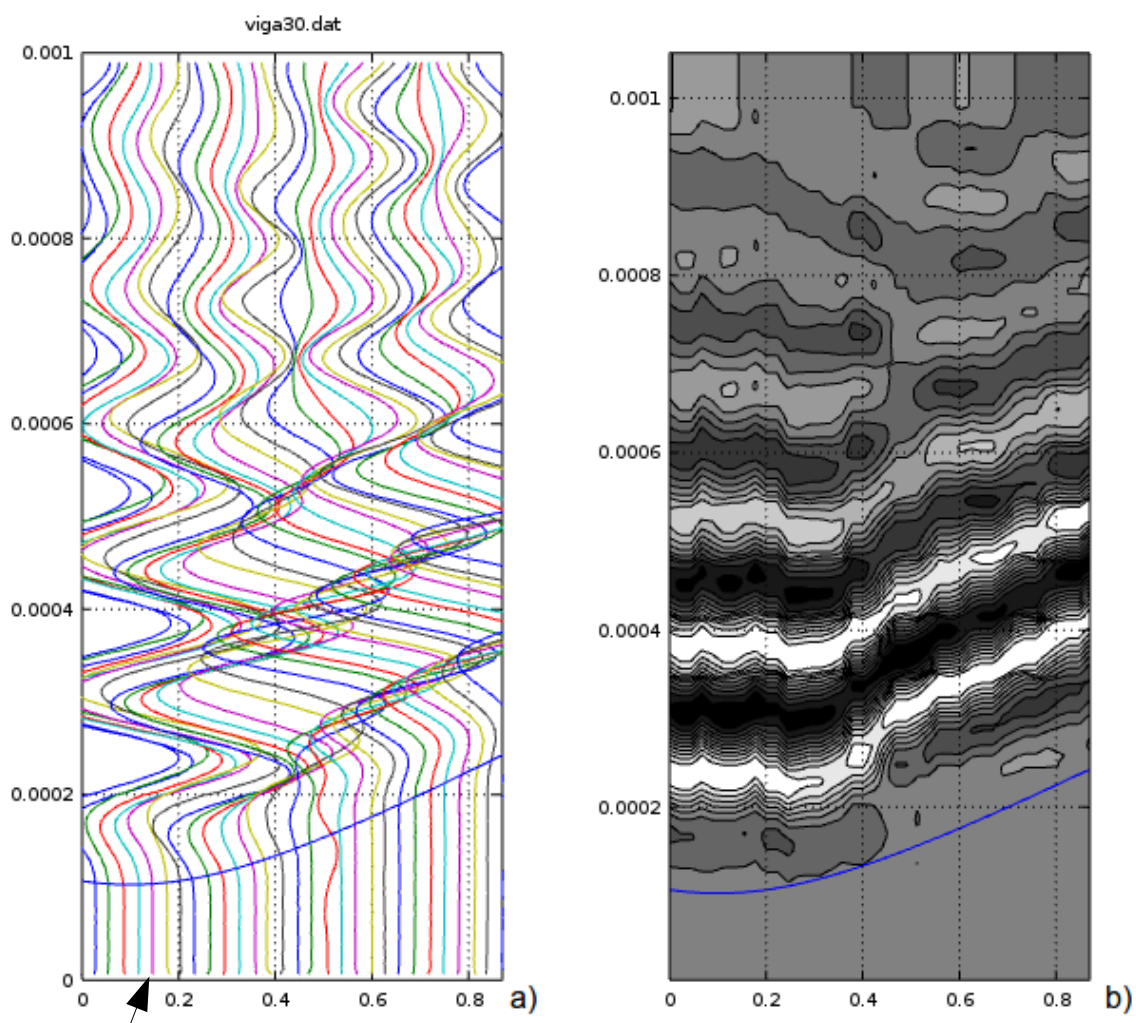
Os dados dos tempos foram então organizados num ficheiro com a geometria da aquisição, esse ficheiro é organizado de acordo com as necessidades técnicas do *SeismicPanel*.

#### 5.3.1. Viga em Betão Armado:

No caso da viga de betão armado, para além da tomografia por tempos de transiluminação, a velocidade média é determinada pelas representações gráficas dos sinais sísmicos por canal, ou seja, foi criada uma rotina em Octave/MATLAB<sup>TM</sup>, ver Anexo 5, que faz uma representação gráfica dos sinais sísmicos em linha, ver fig. 32a), portanto cada um dos trinta tiros é representado no mesmo gráfico, e uma representação em tons de cinzento, fig. 32b), em que os dados são representados em termos de sinal, positivo mais claro, e negativo, mais escuro, é de notar, que quanto mais perto do branco mais positivo, e quanto mais perto do preto mais negativo é o sinal sísmico, portanto pode ter-se uma noção

representativa das amplitudes e do sinal (em ternos de positividade e negatividade). Esta rotina faz também uma representação de uma hipérbole teórica que por introdução de velocidades (introduzidas na rotina, ver linha 18 do Anexo 5) de propagação das ondas sísmicas ajusta-se manualmente ao primeiro sinal sísmico recebido (primeiras chegadas). Assim é possível identificar uma velocidade aproximada média para a propagação das ondas sísmicas através do meio estudado.

Com este processo, através do ajuste da hipérbole de velocidades, obteve-se uma velocidade média na viga de  $3500\text{ms}^{-1}$ .



*Figura 32: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 3, e ajuste da hipérbole, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,2, GNU Octave.*



Como referido na descrição deste elemento estrutural, este apresentava uma fractura visível. Na representação gráfica do sinal registado no canal 3, é possível identificar uma reflexão, fig. 33b).

Sabe-se que sempre que se verifica uma fractura num material, existem meios com impedâncias diferentes, isso poderá provocar atrasos nos sinais sísmicos e portanto quando se faz o cálculo de velocidades, principalmente em tomografia sísmica, deverão verificar-se velocidades menores no local da fractura.

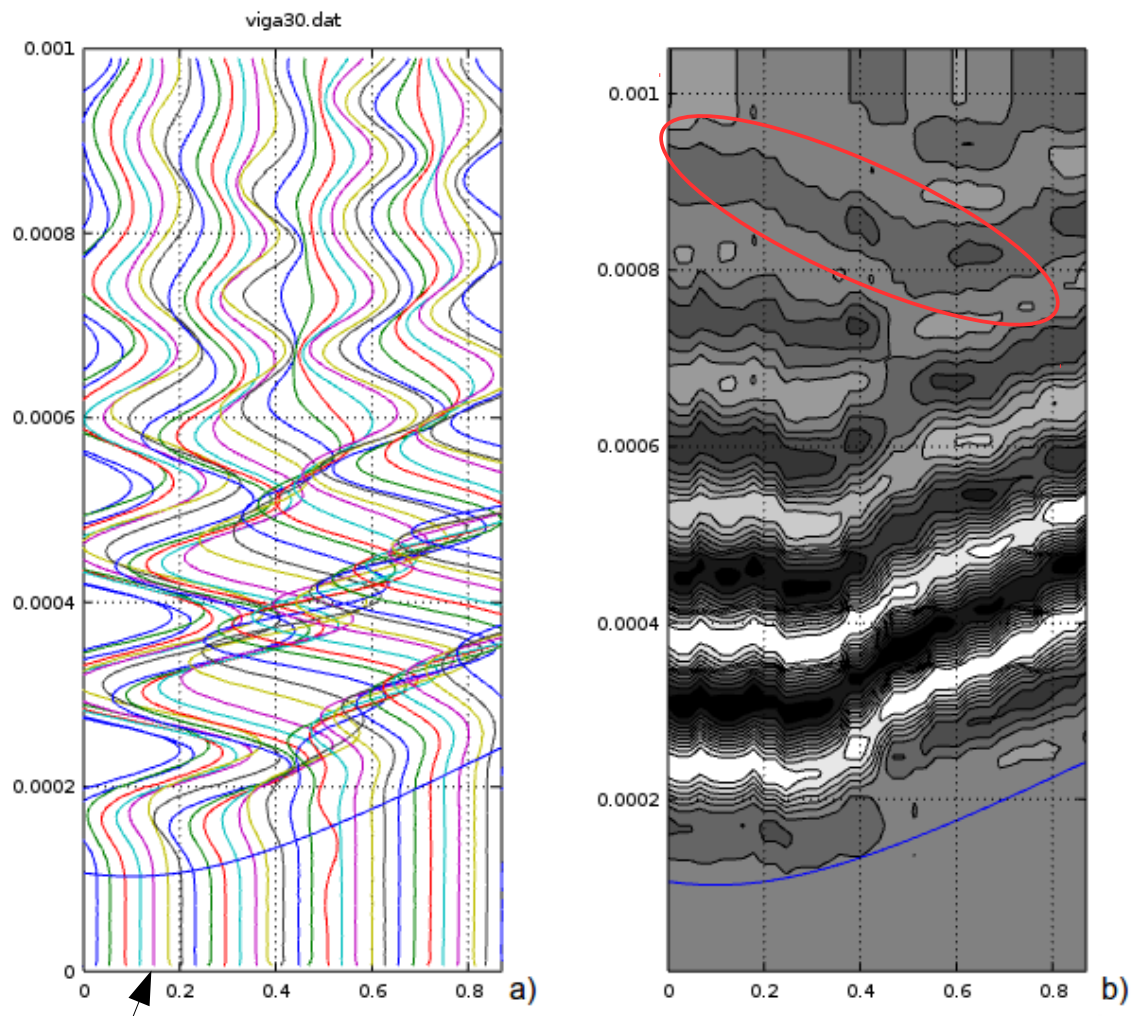


Figura 33: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, e ajuste da hipérbole, canal 3, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,2. A vermelho está realçada uma possível reflexão que o sinal sofre na fractura observada. GNU Octave

A fig. 34 mostra o resultado da inversão tomográfica dos *picking* feitos aos sinais obtidos na viga.

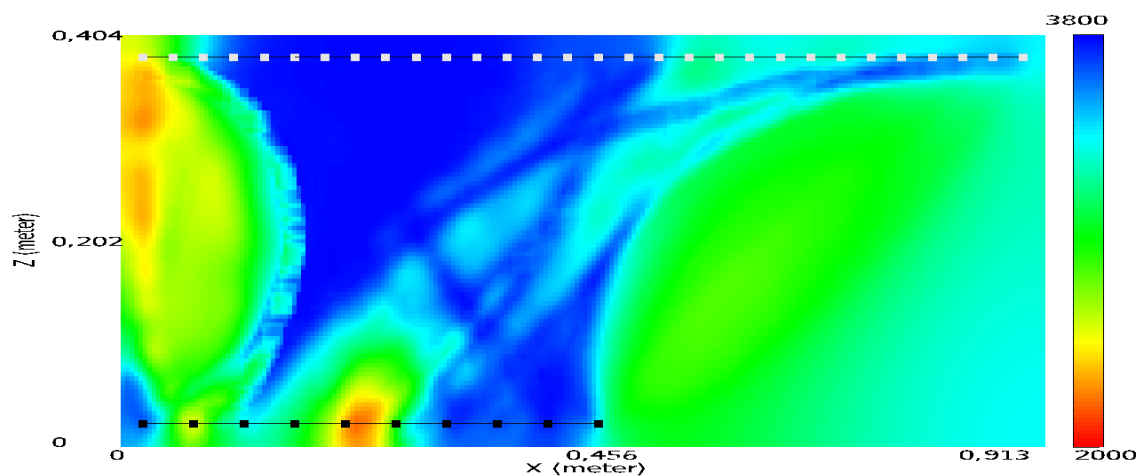


Figura 34: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação na viga de betão armado, inversão tomográfica com raios curvos, velocidades entre 2000 e 3800  $\text{ms}^{-1}$ .

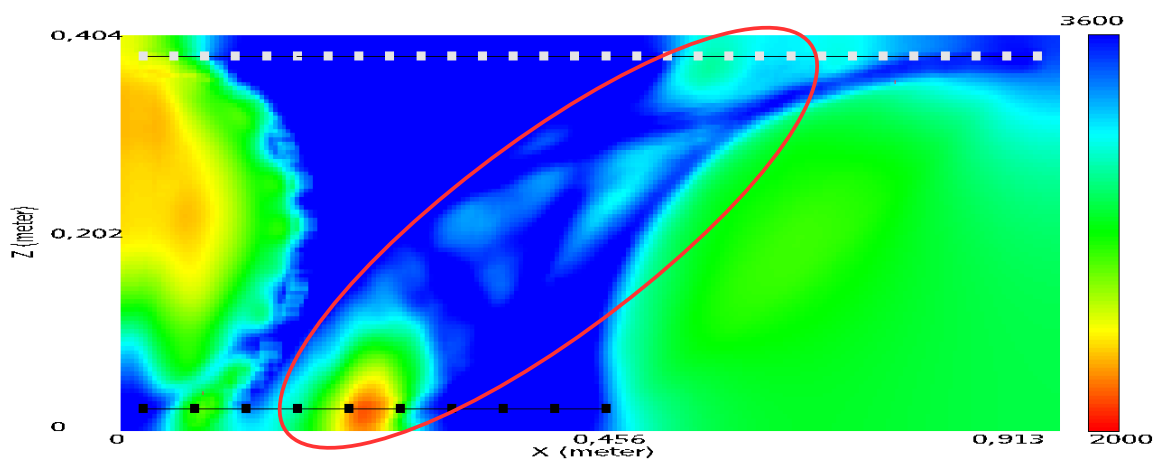
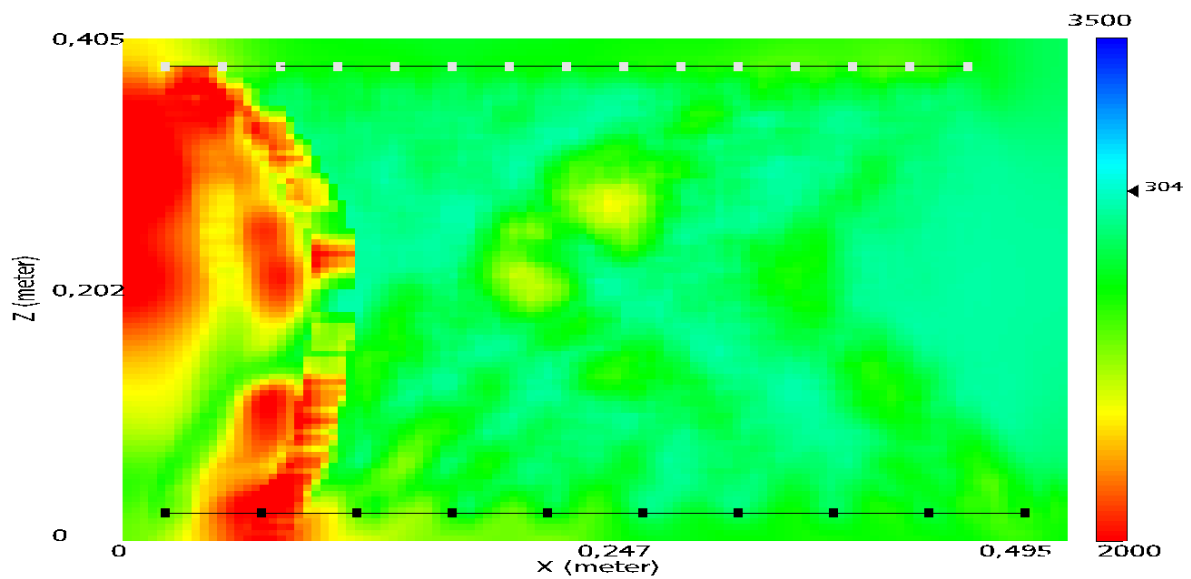


Figura 35: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação na viga de betão armado, inversão tomográfica com raios curvos, e velocidades entre 2000 e 3600  $\text{ms}^{-1}$ . A vermelho realça-se uma faixa de menor velocidade.

Na fig. 35 é possível identificar uma faixa no interior da viga de menor velocidade, poderá assumir-se que esta faixa se deve à presença da fractura.

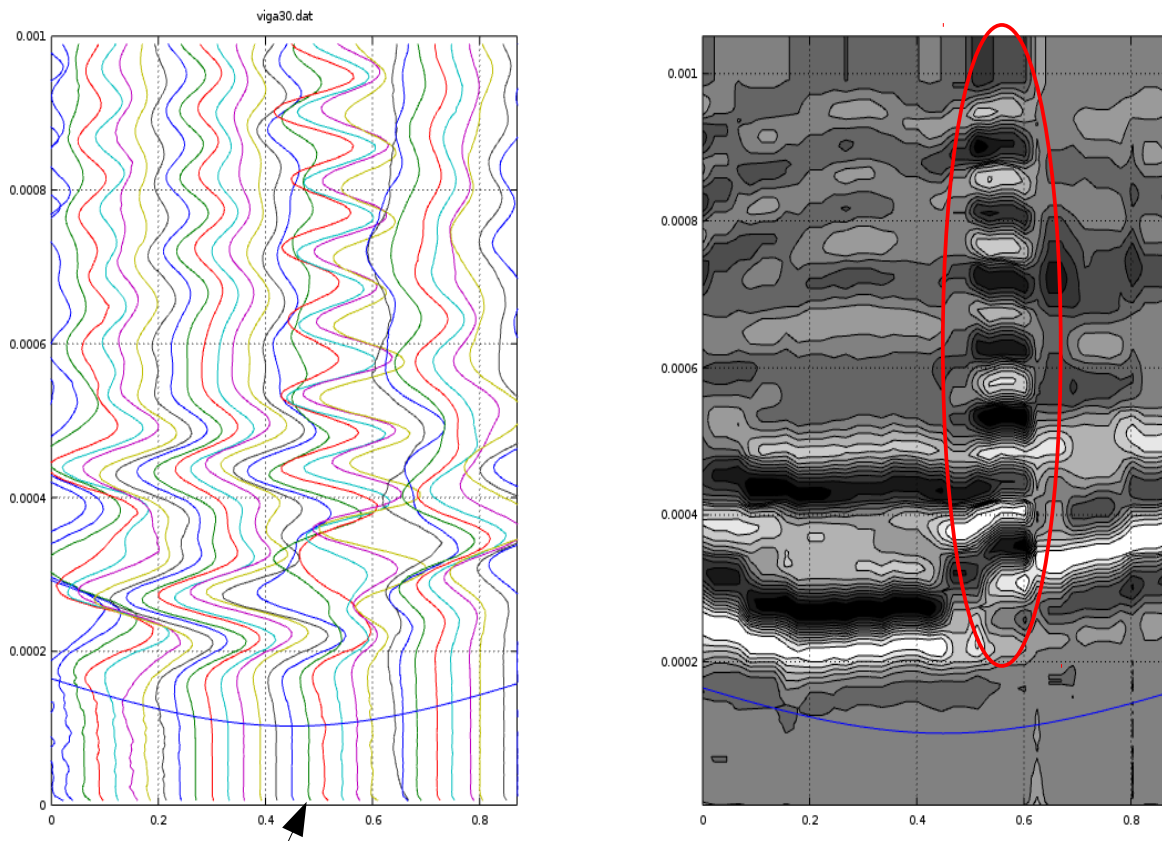
Para facilitar a compreensão da discretização de velocidade, procedeu-se a uma nova tomografia, com geometria de transdutores e fontes aproximadamente paralelos.



*Figura 36: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação na viga de betão armado, inversão tomográfica com raios curvos, e velocidades entre 2000 e 3500 ms<sup>-1</sup>. A vermelho realça-se uma faixa de menor velocidade.*

A partir da análise da fig. 36 pode verificar-se que a viga de betão armado tem uma velocidade média de propagação das ondas sísmicas de 3040ms<sup>-1</sup>.

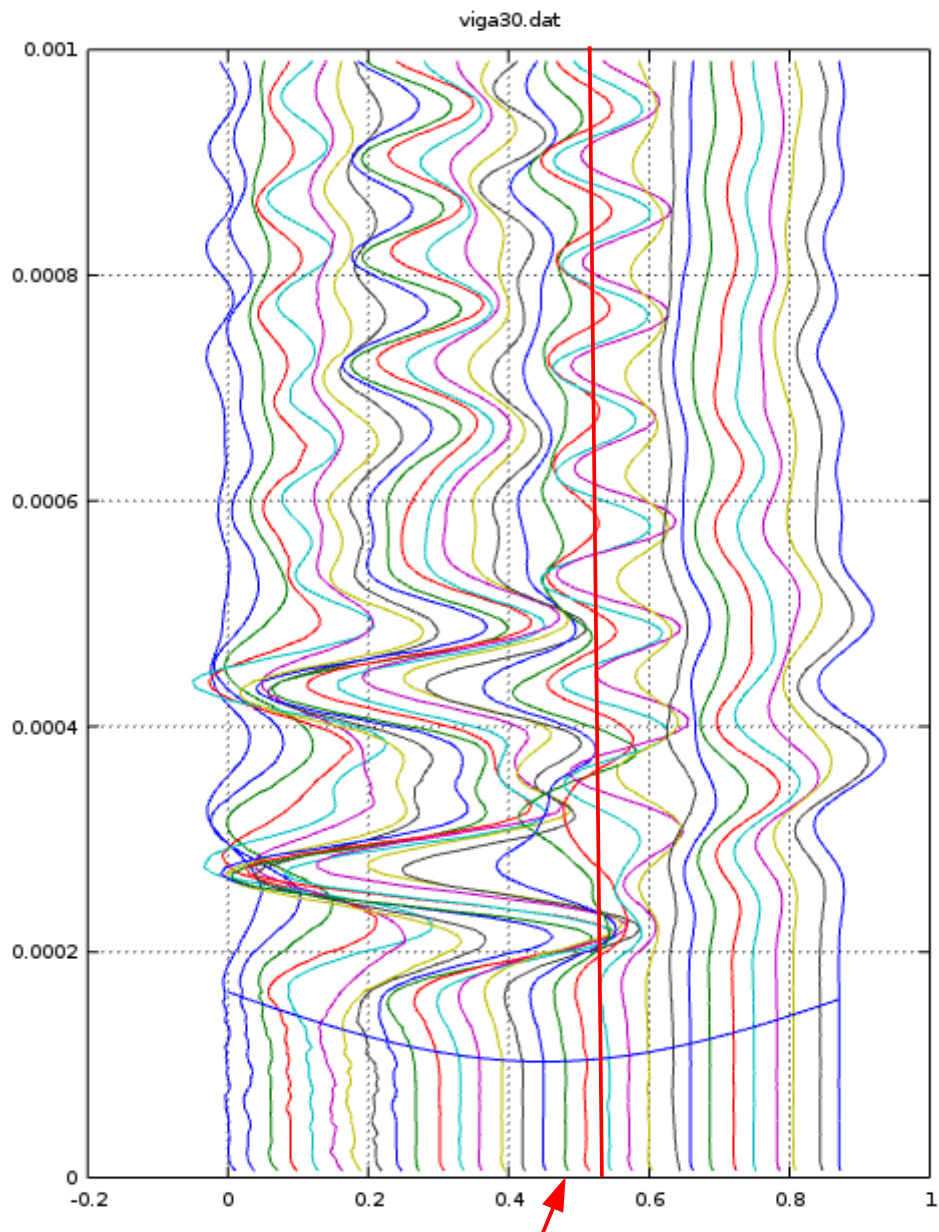
Uma fractura poderá provocar uma reverberação interna do sinal sísmico, principalmente nos canais mais próximos dessa fractura, esse caso é especialmente notório na representação gráfica do canal 10. Na fig. 37 encontra-se realçada a vermelho uma janela do sinal sísmico que poderá ser essa reverberação do sinal sísmico, pois este fica aprisionada na fractura.



*Figura 37: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, e ajuste da hipérbole, canal 10, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,1. A vermelho está representada uma reverberação do sinal sísmico, provavelmente devido à fractura. GNU Octave.*

Até agora todos os sinais representados graficamente foram normalizados ao máximo, para que se haja uma melhor visualização e interpretação dos sinais obtidos se estes tiverem todos a mesma amplitude, na prática sabe-se que não é assim.

Então se fizer uma representação gráfica do sinal sísmico não normalizado verifica-se que este perde amplitude imediatamente a seguir à fractura. Na fig. 38 verifica-se exactamente isso.



*Figura 38: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 10, a seta a vermelho indica o local de tiro, e a linha a vermelho indica o local onde a fratura se encontra, 200 pontos, escala 0,000025.*

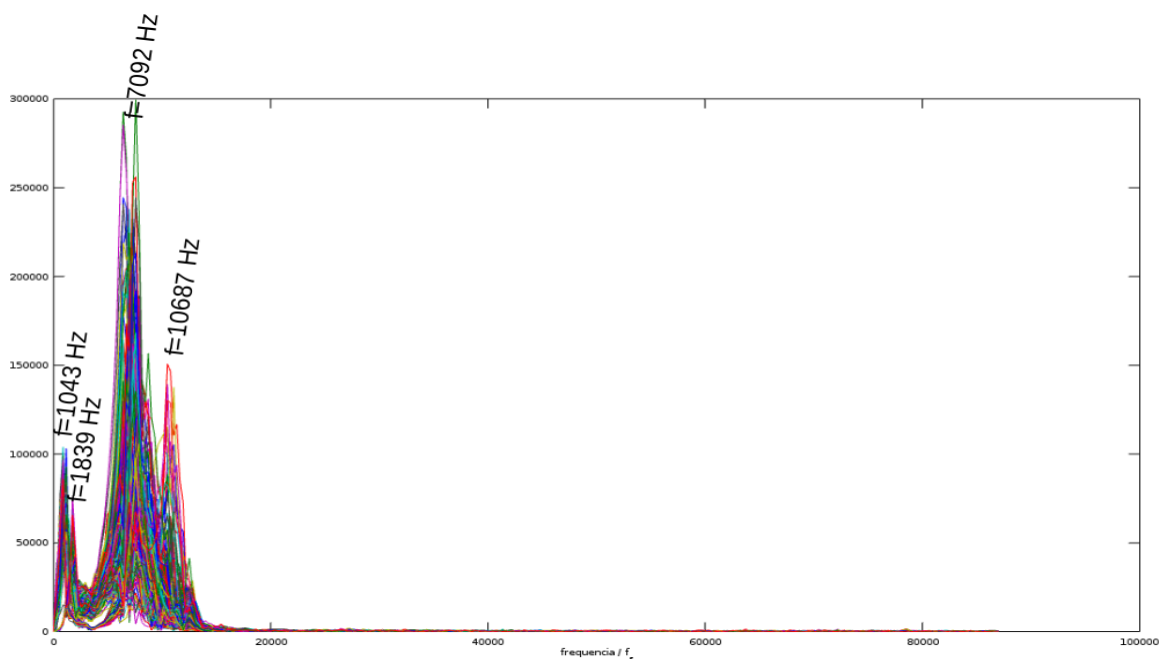
Por razões académicas vamos assumir que a fratura se encontra preenchida com água.

Sabendo que a velocidade de propagação das ondas sísmicas na água é em média de  $1480\text{ms}^{-1}$ , Greenspan et Tschiegg (1957) e uma densidade de  $1\text{gcm}^{-3}$ , e tendo em conta que a velocidade obtida é de  $3500\text{ms}^{-1}$ , e que a densidade média do betão é de  $2,3\text{gcm}^{-3}$ , Hirschi

et al., (2005), então pela fórmula do coeficiente de transmissão em termos de amplitude (13), enunciada no sub-capítulo 2.4., verifica-se que o sinal perde 69% da sua amplitude (cálculos efectuados no Anexo 9). Esses dados são coerentes com o que se observa na fig. 38. Estes dados não são concretos, e estes cálculos são puramente académicos, não podendo concluir-se que a fractura esteja preenchida por água. Pode-se no entanto excluir a possibilidade de estar preenchida com ar, pois se esse fosse o caso, pela fórmula do coeficiente de transmissão em termo de amplitude, verificar-se-ia que o sinal perderia 99,99% da sua amplitude, (cálculos efectuados no Anexo 9).

As representações gráficas dos sinais sísmicos obtidos na viga de betão armado estão no Anexo 7.

Na fig. 39 apresenta-se o espectro de frequências do sinal obtido na viga de betão armado.



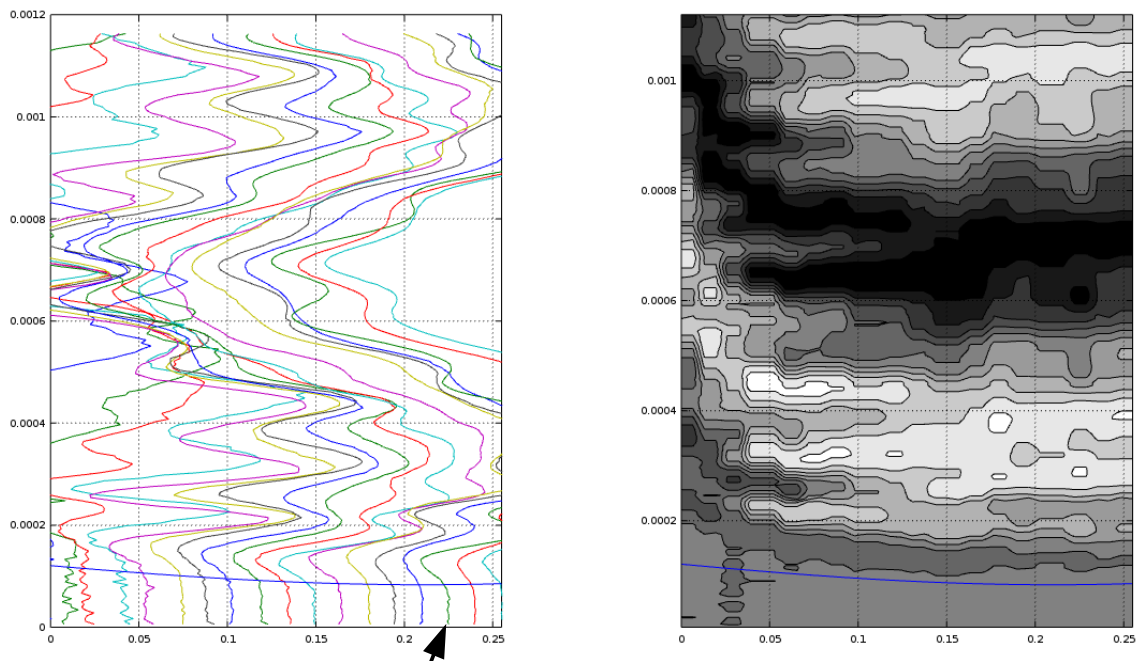
*Figura 39: Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos na viga, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist, GNU Octave.*

As frequências aqui obtidas são discutidas no sub-capítulo 5.4. Para visualização mais pormenorizado dos espectro de frequências ver Anexo 12.

### 5.3.2. Bloco de Alvenaria em Calcário:

No bloco de alvenaria em calcário, para além da tomografia por tempos de transiluminação, a velocidade média é determinada pelas representações gráficas dos sinais sísmicos por canal. Este processo é usado em todos os ensaios.

Como observável na fig. 40 com o ajuste da hipérbole teórica, obtém-se assim uma velocidade média de propagação das ondas sísmicas de  $2400\text{ms}^{-1}$ .

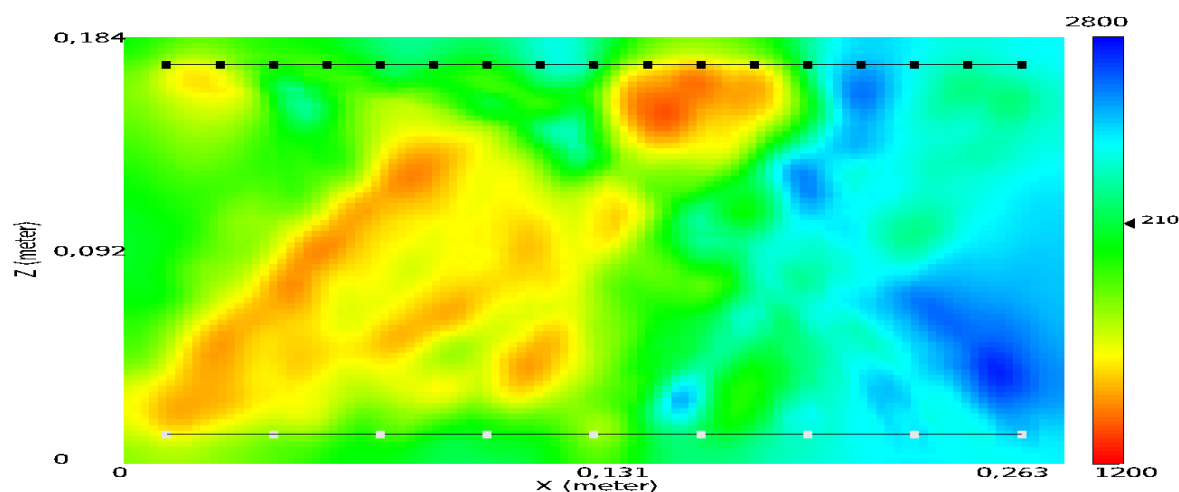


*Figura 40: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, e ajuste da hipérbole, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,15, canal 8, GNU Octave.*

Este elemento estrutural esteve exposto aos elementos e à água salgada por espaço indeterminado de tempo. Pelo que anomalias em termos de velocidades de propagação das ondas sísmicas serão de esperar.

A fig. 41 mostra o resultado da inversão tomográfica dos *picking* feitos aos sinais obtidos no bloco de alvenaria em calcário.





*Figura 41: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação no bloco de alvenaria em calcário, inversão tomográfica com raios curvos, velocidades entre 1200 e 2800 ms<sup>-1</sup>.*

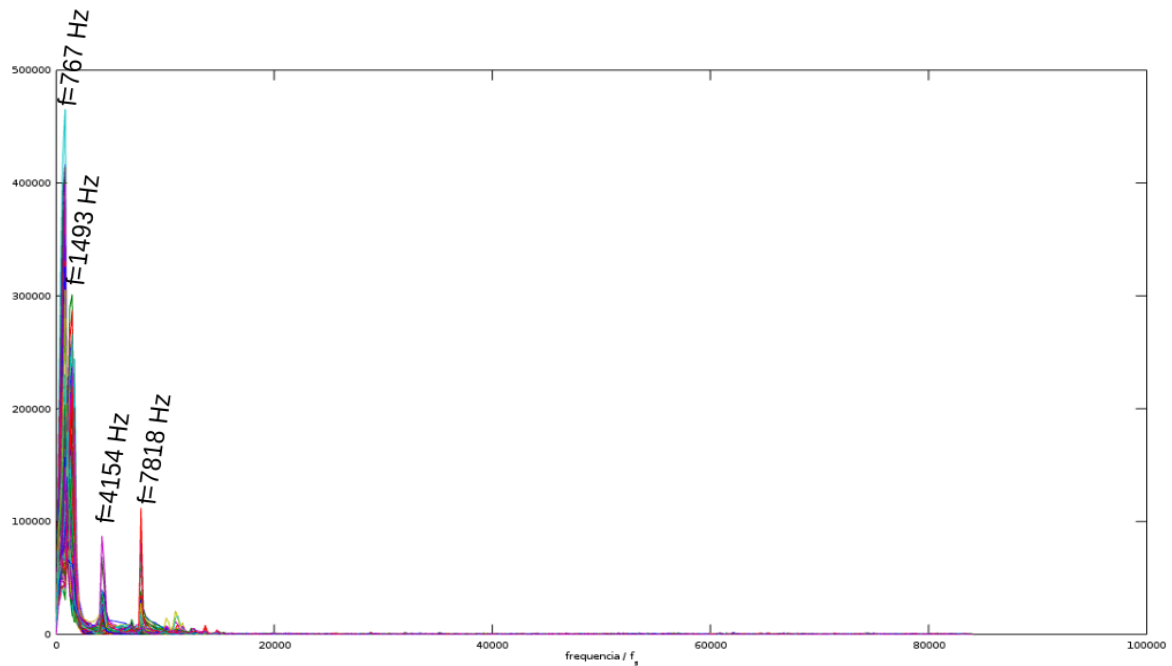
A partir da análise da fig. 41 pode verificar-se que o bloco de alvenaria tem uma velocidade média de propagação das ondas sísmicas de 2100ms<sup>-1</sup>.

Como já era de esperar este bloco apresenta uma anomalia em termos de velocidade de propagação das ondas sísmicas. Esta anomalia é verificada no primeiro canal e nos tiros 11, 12 e 13. Apresenta velocidades entre 1000ms<sup>-1</sup> nas zonas com menor velocidade e 2800ms<sup>-1</sup> nas zonas de maior velocidade.

As representações gráficas dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário estão no Anexo 8.



Na fig. 42 apresenta-se o espectro de frequências do sinal obtido no bloco de alvenaria em calcário.



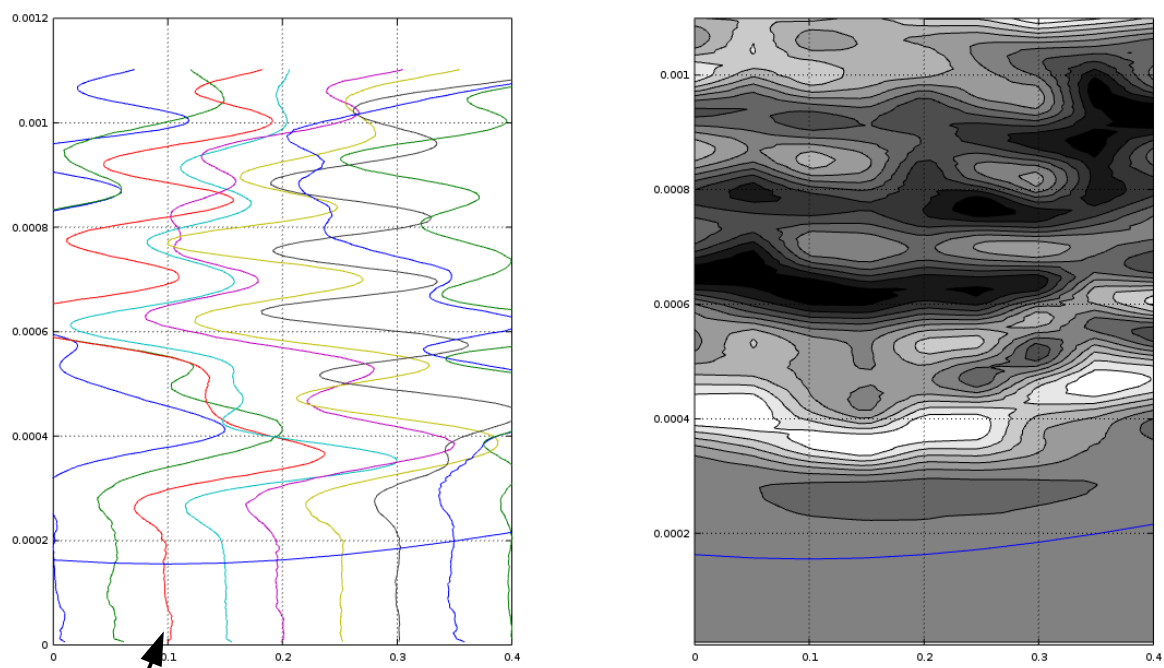
*Figura 42: Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist, GNU Octave.*

As frequências aqui obtidas são discutidas no sub-capítulo 5.4. Para visualização mais pormenorizado dos espectro de frequências ver Anexo 12.

### 5.3.3. Bloco de Alvenaria em Granito:

No bloco de alvenaria em granito, para além da tomografia por tempos de transiluminação, a velocidade média é determinada pelas representações gráficas dos sinais sísmicos por canal.

Como observável na fig. 43 com o ajuste da hipérbole teórica, obtém-se assim uma velocidade média de propagação das ondas sísmicas de  $1800\text{ms}^{-1}$ .



*Figura 43: Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, e ajuste da hipérbole, a seta a preto indica o local de tiro. 200 pontos, escala 0,15, canal 3, GNU Octave.*

Segundo Gama e Sousa (2004), um granito são da região do Porto tem velocidade média de propagação das ondas sísmicas de  $4300\text{ms}^{-1}$  e Begonha (2001) apresenta valores que variam entre  $1500$  a  $5600\text{ms}^{-1}$ , em função do grau de meteorização, Anexo 13. Sendo este bloco de alvenaria um letreiro, ou seja, foram esculpidas letras nele, pode assumir-se, para facilidade de trabalhos de escultura que a rocha já tivesse sofrido meteorização antes da sua utilização com alvenaria em letreiro.

A fig. 44 mostra o resultado da inversão tomográfica dos *picking* feitos aos sinais obtidos no bloco de alvenaria em granito.

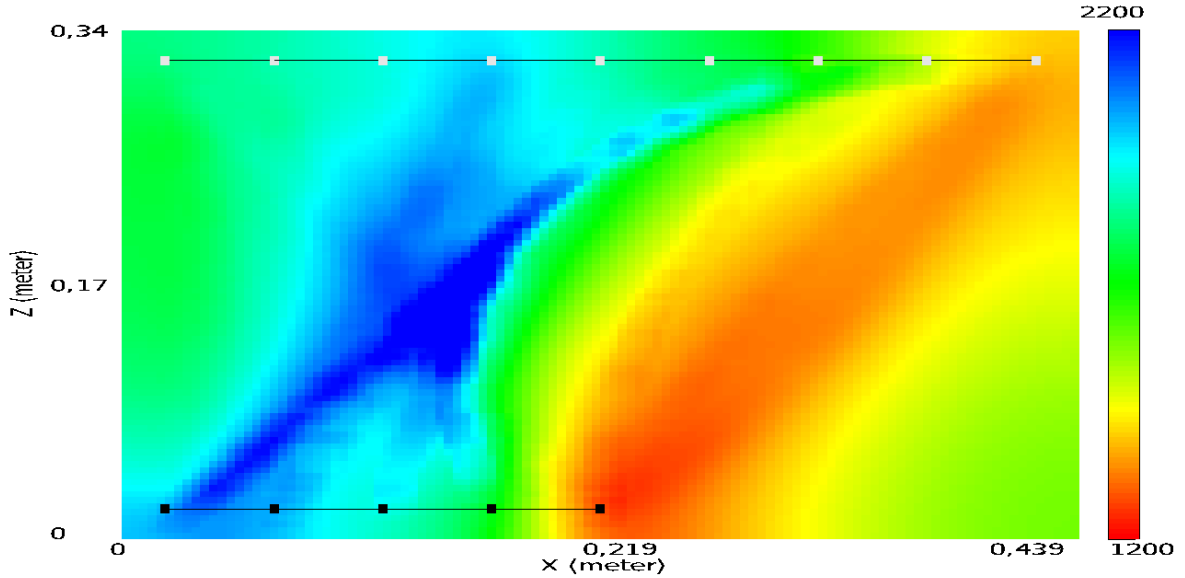


Figura 44: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação no bloco de alvenaria em granito, inversão tomográfica com raios curvos, velocidades entre 1200 e 2200  $\text{ms}^{-1}$ .

Para facilitar a compreensão da discretização de velocidade, procedeu-se a uma nova tomografia, com geometria de transdutores e fontes aproximadamente paralelos.

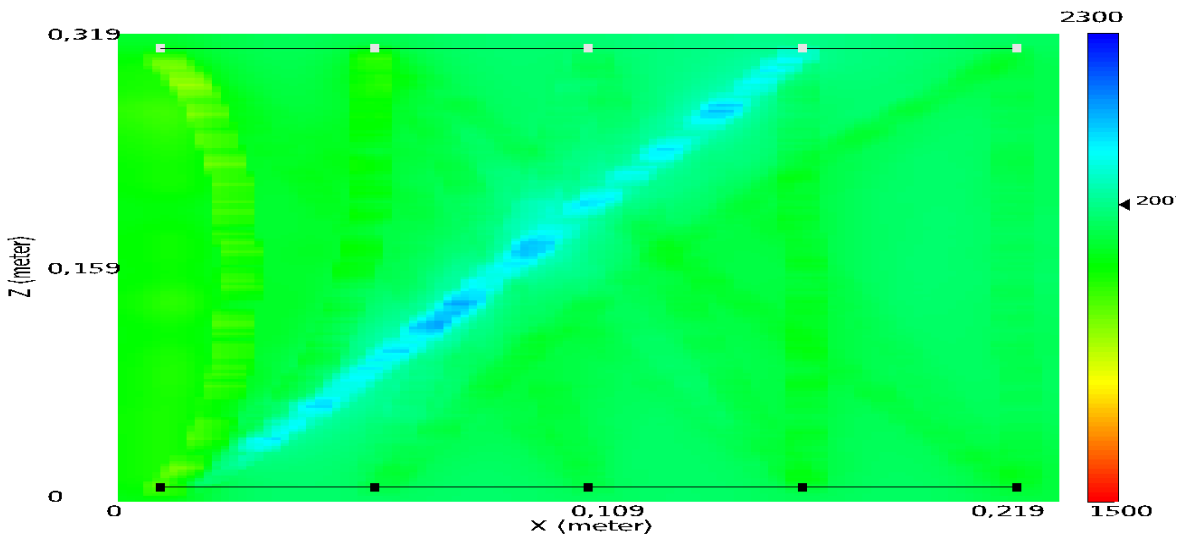
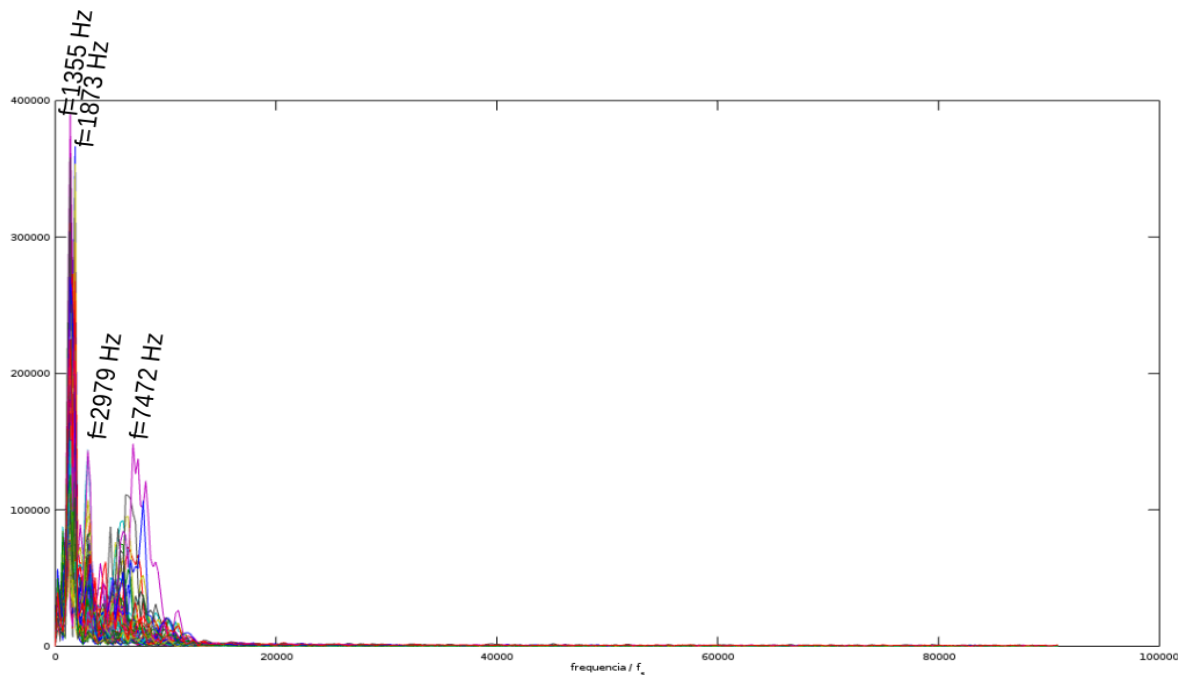


Figura 45: Tomografia sísmica para os tempos de transiluminação no bloco de alvenaria em calcário, inversão tomográfica com raios curvos, e velocidades entre 1500 e 2300  $\text{ms}^{-1}$ .

A partir da análise da fig. 45 pode verificar-se que o bloco em alvenaria em granito tem uma velocidade média de propagação das ondas sísmicas de  $2000\text{ms}^{-1}$ .

As representações gráficas dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito estão no Anexo 10.

Na fig. 46 apresenta-se o espectro de frequências do sinal obtido no bloco de alvenaria em granito.



*Figura 46: Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist, GNU Octave.*

As frequências aqui obtidas são discutidas no sub-capítulo 5.4. Para visualização mais pormenorizado dos espectro de frequências ver Anexo 12.

#### 5.4. Frequência de resposta dos transdutores:

No Anexo 12 encontram-se os espectros de frequências obtidos para os vários ensaios, estes foram construídos com a rotina do Anexo 11 no Octave. Como visto no sub-capítulo 3.3. uma frequência de resposta do transdutor elevada é fundamental para uma boa campanha de NDT, pois recebe sinais sísmicos de maior amplitude, aumentando a precisão na marcação das primeiras chegadas. Os transdutores construídos neste trabalho têm uma frequência própria da oscilação, tendo em conta os espectros os valores de frequência variam entre 0,7 a 11kHz de acordo com a tabela 2.

*Tabela 2: Principais picos em frequências obtidos pelos espectros de frequências dos vários ensaios*

	Viga	Alvenaria em calcário	Alvenaria em granito
Frequência 1 (Hz)	1043	767	1355
Frequência 2 (Hz)	1839	1493	1873
Frequência 3 (Hz)	7092	4154	2979
Frequência 4 (Hz)	10687	7818	7472
Velocidade Vp (m/s)	3040	2100	2000

Não se encontra um valor único nos três ensaios portanto poderá assumir-se que as várias frequências obtidas sejam devidas à forma da amostra ensaiada.

A baixas frequências observadas podem ser reverberações das ondas sísmicas de menor velocidade S.



## 6. Conclusões:

A instrumentação construída foi efectiva na determinação da velocidade de propagação das ondas sísmicas nos elementos activos de suporte de estruturas estudados neste trabalho.

A placa de desenvolvimento Arduino foi suficiente na aquisição e sinais sísmicos e os transdutores construídos deram bom resultado na conversão da energia mecânica das ondas sísmicas em energia eléctrica mensurável. No entanto ruído criado durante a aquisição, principalmente pelo sistema de disparo, afecta a qualidade de sinal adquirido. Pelo que melhoramentos futuros são indispensáveis.

Com os sinais obtidos e a posterior medição e velocidades de propagação das ondas sísmicas, foi possível identificar várias anomalias estruturais no elementos de alvenaria, sendo que se obtiveram melhores resultados na viga de betão armado.

Obtiveram-se velocidades de propagação das ondas sísmicas de  $3040\text{ms}^{-1}$  pelo método da inversão tomográfica na viga de betão armado,  $2100\text{ms}^{-1}$  no bloco de alvenaria em calcário e  $2000\text{ms}^{-1}$  no bloco de alvenaria em granito.

Este sistema pode ser empregue em NDT pois possui características essenciais, como, uma taxa de amostragem elevada ( $166\text{kHz}$  para 5 canais), e transdutores que respondem a uma banda de frequências própria que pelos espectros dos sinais sísmicos adquiridos variam entre 0,8 e  $11\text{kHz}$ .

Os objectivos fundamentais foram atingidos, com a construção do sistema de aquisição e determinação de velocidades através das primeiras chegadas, contudo, será importante fazer o estudo variando a orientação dos sensores e aprofundando assim o estudo dos modos de ressonância num bloco.

## **Bibliografia:**

- Hearne, T., Stokeo, K., Reese, L., (1981) "Drilled\_shaft integrity by wave propagation method", J Geotech. Eng. 107, pp. 1327-1344.
- Keiswetter, D. A., Steeples, D. W., (1995) "A field investigation of source parameters for sledgehammer" Geophysics, Vol. 60, No. 4 pp 1051-1057
- Petrou, M. F., Perdikaris, P. C., Duan, M., (1996) "Static behavior of noncomposite concrete bridge decks under concentrated loads", J. Bridge Eng. ASCE 1 pp. 143-154.
- Liu, L., Guo, T., (2005) "Seismic non-destructive testing on a reinforced concrete bridge column using tomographic imaging techniques", J. Geophys. Eng. 2 pp 23-31
- Dineva, P. S., Gross, D., Müller, R., Rangelov, T., (2014) "Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials", Springer International Publishing Switzerland, ISBN 978-3-319-03961-9
- Curie, J., Curie, P., (1982) "Phénomènes électriques des cristaux hémihédres à faces Inclinaées" J. Phys. Theor. Appl., pp 245-251
- Lippmann G., (1881) "Principe de la conservation de l'électricité, ou second principe de la théorie des phénomènes électriques", J. Phys. Theor. Appl., pp 381-394
- Repas, R., (2008) "Sensor sense: Piezoelectric Force Sensors", Machine Design, [online] <http://machinedesign.com/sensors/sensor-sense-piezoelectric-force-sensors>. [Setembro 2016]
- Ledoux, A., (2011) "Theory of Piezoelectric Materials and their Applications in Civil Engineering", Masachusetts institute of Tecnology
- Bowen, C. R., Kim, H. A., Weaver, P. M., Dunn, S., (2014) "Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications" Royal Society Of Chemistry
- Thompson, B. D., Gandhi, M. V., (1992) "Smart Materials and Structures" Springer ISBN 10: 0412370107
- Preumont A., (2011) "Vibration Control of Active Structures, An Introduction " Springer ISBN 978-94-007-2033-6
- Arduino Guide (2016) "What is Arduino?" [online] <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. [Setembro 2016]
- Atmel (2015(a)), "ATMEL 8-DIP MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH", Atmel-8271JS-AVR-Atmega-Datasheet\_11/2015



Atmel (2015(b)), “Atmel | SMART ARM-based MCU”, Atmel-11057C-ATARM-SAM3X-SAM3A-Datasheet\_23\_Mar\_2015

Boonyasiriwat, C., (2016) “Seismic Panel: User Manual” Draft Version

Prakash, S., H., Yogananda, K., C., Manjanna, J., (2013) “Synthesis of Lead Zirconate Titanate and Contruction of Mechanism for Real Time Voltage with Applied Force Measurement” in 2013 Anual IEE India Conference

Duarte, J., A., R., (2014) “Controlo ativo de estruturas com elementos piezoelétricos: diferentes estratégias de controlo” Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica

Lima, D., N., F., G., (2013) “Controlo dinâmico ativo piezoelétrico de estruturas: atuação pulsada”, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica

Charnegie, D., (2007) “Frequency Tuning Concepts For Piezoelectric Cantilever Beams and Plates for Energy Harvesting”, B.S. in Mechanical Enginnering, University of Pittsburgh

Wang, Q., M., Du, X., H., Xu, B., Cross, L., E. (1999) “Theoretical analysis of the sensor effect of cantilever piezoelectric benders”, American Institute of Physics, S0021-9879(99)05302-5

Recktenwald, G., (2012) “Voltage Dividers and Potenciometers”, Living with the Lab

Kirchhoff, R., G., (1857) “Ueber die Bewegung der Elekticität in Leitem”, Annalen der Physik, volume 102, pp 529

Braun Aktiengesellschaft “Piezoelectric igniter for lighters”, Mohr, W., E.U.A. Concessão US3984738 A. 5 Out 1976. H02N2/00

Preston, J., S., “Method and apparatus for generating electricity while a user is moving”. PRESTON, JOSHUA S. E.U.A. Concessão US8013463 B2. 6 Set 2011. F03B13/00

Coutu, Daniel, Brailovki, Vladimir, Terriault, Patrick, (2010) “Optimized design oaf an active extrados structure for an experimental morphing laminar wing.” in “Aerospace Science and Technology”. ISSN 1270-9638. Vol. 14, nº7, pp. 451-458

Silva, S., M., (2003) “Shape and vibration control of composite structures using genetic algoithms”. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto

Moheimani, S., O., R.; Fleming, A., J. (2010) “Piezoelectric Tranducers for Vibration Control and Damping”. Springer, ISBN9781849965828

Chen, C., J., (1993) "Introduction to scanning tunneling microscopy". Oxford University Press New York

Westinghouse Electric & Manufacturing Company "Piezo Electric Loud Speaker". Chubb, L., W., E.U.A. Concessão 152639. 17 Fev 1925

Firth, D.; Government, Magnavox Company.; Division, Industrial (1965) "Quartz Crystal Oscillator Circuits Design Handbook". Magnavox Company

Labanca, M., [et al.] "Piezoelectric surgery: Twenty years of use". British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. ISSN 0266-4356. Vol. 46, nº4, pp. 265-269

Mancini, R., (2002) "Op Amps For Everyone" Design Reference. Advanced Analog Products. Texas Instruments. SLOD006B

Serway, R. A., (1992) "Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics" 3rd edition, Updated Printing, Saunders College Publishing, pp 429-503

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., (1990) "Applied Geophysics", Second Edition, Cambridge University Press, ISBN 0-521-32693-1 pp. 136-280

Milsom, J., (2003) "Field Geophysics" The geological field guide series 25 John Wiley and Sons, p. 232 ISBN 978-0-470-84347-5

Kearey, P., Brook, M., Hill, I., (2009) "Geofísica de exploração", primeira edição. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos.

Menke, W., (1989) "Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory" Academic Press Elsevier

Jones, I. F., (2010) "Tutorial: Velocity estimation via Ray-based tomography" First Break

Scales, J. A., Smith, M. L., Trietel, S., (2001) "Introductory Geophysical inverse Theory", Samizdat Press

Wang, C., Delome, H., Calderon, C., Yingst, D., Leveille, J., Bloor, R., Farmer, P., (2011) "Practical strategies for Waveform inversion" SEG technical program expanded abstracts. Society of Exploration Geophysicists.

Marins, J., L., (1992) "mapeamento de estruturas Internas de Rochas Reservatórios através de Inversão Tomográfica", Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica – Universidade Federal de Bahia, Salvador, BA.

Lines, L., Newrick, R., (2004) "Fundamentals of Geophysical Interpretation" First Edition, Society of Exploration Geophysicists. ISSN 978-1-56080-125-2

Berryman, J. G., (1991) “Lectures Notes on Nonlinear Inversion and Tomography” Lecture notes from MIT

Eaton, W., J., (1998) “About GNU Octave” [online]  
[https://pt.wikipedia.org/wiki/GNU\\_Octave](https://pt.wikipedia.org/wiki/GNU_Octave) [Setembro 2016]

Eaton W., J., Bateman, D., Hauberg, S., Wehbring, R., (2016) “GNU Octave: Free Your Numbers” Edition 4 for Octave Versiton 4,2,0, Outubro 2016

“União das freguesias: Custóias, Leça do Balio e Guifões” (portal online] <http://www.jf-custoias-lecabalio-guifoes.pt/pt/freguesias/leca-do-balio/galeria-de-imagens> [consultado em Setembro 2016]

Santos, A., F., (2015) “História do Porto – Mosteiro de Leça do Balio- Caminho Português de Santiago” [online] <http://pt.slideshare.net/arturfilipesantos/histria-do-porto-mosteiro-de-lea-do-balio-caminho-portugus-de-santiago-artur-filipe-dos-santos> 26 de Out de 2015 [consultado em Setembro 2016]

Barboza, A. C. V., (1852) “Memoria Histórica da Antiguidade do Mosteiro de Leça, Chamada do Balio”, Porto: Em Cada de Ignacio Corrêa, Editor e Livreiro, Rua de Bellomonte, nº 64

Lousada, J., Noronha, M., Lopes, D., Silva, M., (2008) “Relações entre Peso, Volume e Densidade para a Madeira de Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster* Ait.) Cultivado em Portugal”, Silva Lusitana 16(2): 183-196, EFN, Lisboa. Portugal

Jones, F., E., (2078) “The Air Density Equation and the Transfer of the Mass Unit”, JOUNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards Vol. 83, No 5, September-October

Greenspan, M., Tschiegg, C., E., (1957) “Speed of sound in water by a Direct Method” Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 59, No. 4, October 1957

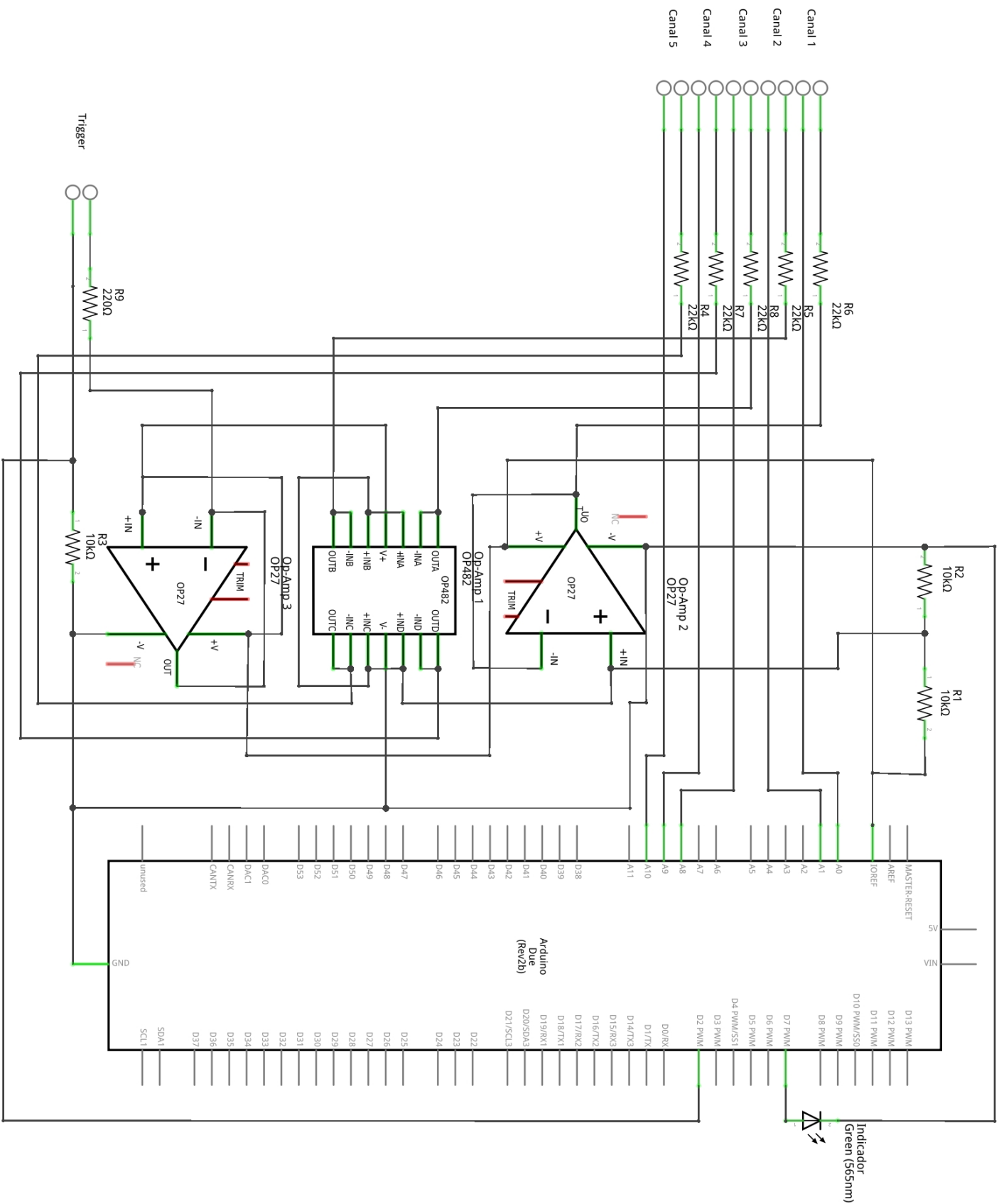
Hischi, T., Knauber, H., Lanz, M., Schlumpf, J., Schrabback, J., Spirig, C., Weaber, U., (2005) “Sika® Concrete Handbook”, December

Gama, C., D., Sousa, R., M., (2004) “Caracterização Geotécnica Expedita do Granito do Porto Para Fins de Escavação de Túneis” 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro 2004

Begonha, A., J., S., (2001) “Meterorização do Granito e Deteorisação da Pedra em Monumentos e Edifícios da Cidade do Porto” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp. 107 ISBN: 972-752-041-3

## **Anexos**

# Anexo 1



## Anexo 2

```
unsigned long times[3000];
unsigned long values1[1000];
unsigned long values2[1000];
unsigned long values3[1000];
unsigned long values4[1000];
unsigned long values5[1000];
int trigger=2;
int boom=8;
int LED=7;

void setup() {
  analogReadResolution(12);
  Serial.begin(115200);
  pinMode(trigger,INPUT);
  pinMode(LED, OUTPUT);
  digitalWrite(LED,HIGH);
  //ADC Configuration
  ADC->ADC_MR |= 0x80; // coloca o ADC em modo free running ou curso livre
  ADC->ADC_CR=2;      // inicia a conversão ADC
  ADC->ADC_CHER=0x1CC0; // permite conversão ADC nos canais 0, 1, 8, 9 and 10.
}

void loop() {
  int i;
  while (digitalRead(trigger)==LOW);
  //if (digitalRead(trigger)==HIGH) {
    digitalWrite(LED, LOW);
    for (i = 0; i <=1000; i++) {
      int start_times = micros();
      while((ADC->ADC_ISR & 0x1CC0)!=0x1CC0);
      values1[i] = ADC->ADC_CDR[7];
      values2[i] = ADC->ADC_CDR[6];
      values3[i] = ADC->ADC_CDR[10];
      values4[i] = ADC->ADC_CDR[11];
      values5[i] = ADC->ADC_CDR[12];
      delayMicroseconds(0);
      int stop_times = micros();
      times[i] = stop_times - start_times;
    }
    for (i = 0; i < 1000; i++) {
      Serial.print(values1[i]);
      Serial.print("\t");
      Serial.print(values2[i]);
      Serial.print("\t");
      Serial.print(values3[i]);
```

```
Serial.print("\t");  
Serial.print(values4[i]);  
Serial.print("\t");  
Serial.print(values5[i]);  
Serial.print("\t");  
Serial.print(times[i]);  
Serial.println();  
}  
digitalWrite(LED, HIGH);  
}
```

### Anexo 3

```
mesa=load ('dados.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);           % O 'x' indica cada tiro efectuado
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
t=(cumsum(mesa(1:janela,6)))/1000000;

A=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;

%maxa=max(abs(A))

uns=ones(janela,1);

%unsA=uns*maxa
unsmed1=uns*meda1;

%maxa=max(abs(A))
meda=mean(A);

uns=ones(janela,1);

%unsA=uns*maxa
unsmed=uns*meda;
A=A-unsmed;
maxa=max(abs(A));
unsA=uns*maxa;
%A=A./unsA; % Normalização ao maximo

%A(1,:)=[];

n=length(A);
l=0:n-1;
plot (t, A(:,1),'b', t,(A(:,2)),'r', t,(A(:,3)),'g',t,(A(:,4)),'k', t,(A(:,5)),'m')
```

Save dados1.dat A



#### Anexo 4

```
dados1=load ('pedra2_t10.dat');

#dados2=load ('Pedra6_9t19.dat');

dados1(1,:)=[];
janela=999;
x1=dados1(1:janela,:);
x2=dados1(1001:janela+1000,:);
x3=dados1(2001:janela+2000,:);
x4=dados1(3001:janela+3000,:);
x5=dados1(4001:janela+4000,:);
x6=dados1(5001:janela+5000,:);
x7=dados1(6001:janela+6000,:);
x8=dados1(7001:janela+7000,:);
x9=dados1(8001:janela+8000,:);
x10=dados1(9001:janela+9000,:);
t=(cumsum(dados1(1:janela,6)))/1000000;

A=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;

dados2(1,:)=[];
x11=dados2(1:janela,:);
x12=dados2(1001:janela+1000,:);
x13=dados2(2001:janela+2000,:);
x14=dados2(3001:janela+3000,:);
x15=dados2(4001:janela+4000,:);
x16=dados2(5001:janela+5000,:);
x17=dados2(6001:janela+6000,:);
x18=dados2(7001:janela+7000,:);
x19=dados2(8001:janela+8000,:);
x110=dados2(9001:janela+9000,:);

A1=x11+x12+x13+x14+x15+x16+x17+x18+x19;%+x110;

meda1=mean(A1);

uns=ones(janela,1);
unsmed1=uns*meda1;
A1=A1-unsmed1;
maxa1=max(abs(A1));
unsA1=uns*maxa1;
meda=mean(A);
uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
```

```

A=A-unsmed;
maxa=max(abs(A));
unsA=uns*maxa;
n=length(A);
l=0:n-1;
M=[ t A(:,1) A(:,2) A(:,3) A(:,4) A(:,5)];% A1(:,1) A1(:,2) A1(:,3) A1(:,5) A1(:,5)];
plot (t, A(:,1), t, A(:,2), t, A(:,3), t, A(:,4), t, A(:,5))%, t, A1(:,1), t, A1(:,2), t, A1(:,3), t,
A1(:,5), t, A1(:,5))
save pedral0.dat M

```

## Anexo 5

```
partesdosfiches=['01','02','03','04','05','06','07','08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18';
'19','20','21','22','23','24','25','26','27','28','29','30'];

ntiros=length(partesdosfiches)
canais=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10]; %SENSORES
ncanais=length(canais)
canalver=10 % escolher para ver no canal
npontos=200

geofones=[0:0.05:0.5];%[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10]; %posição dos piezo ou canais
shots=[0:0.03:29*0.03];% posições dos tiros
canaistiro=1:ntiros;

pc=geofones(canalver);
%%
z=0.36;
v=3500;

%ver dentro do registo arranjo receptor comum
escala=0.2; % escala para usar sem normalização
%escala=0.00001; % escala para usar com normalização ao maximo
%%
DT=[];%escalatraco=200

for canal=1:ncanais

for tiros=1:ntiros
ficheiro=strcat('viga',partesdosfiches(tiros,:),'.dat');
M=load(ficheiro);
M(npontos+1:end,:)=[];
t=M(:,1);
MV=M(:,2:end);

if tiros==1

namostras=length(t);
TT=repmat(t,1,ntiros);
uns=ones(namostras,1);
unsdesfasa=uns*canais;
unsdesfazatiros=uns*shots;
MV2=zeros(namostras,ntiros);
end

title(ficheiro)
```

```

xlim([canaistiro(1)-1 canaistiro(ntiros)+1])

%MV2(:,tiros)=sign(MV(:,canalver)).*log(abs(MV(:,canalver))); %canal

MV2(:,tiros)=MV(:,canalver); %canal

end

maximos=max(abs(MV2));
uns=ones(namostras,1);
MAXMV2=uns*maximos;
MV2=MV2./MAXMV2; % normalização ao maximo

MV2D=escala*MV2+unsdesfazatiros;
subplot(1,2,1)
plot(MV2D,TT)
hold on
[tempo]=curvas(shots,pc,z,v);
x=shots;
plot(shots,tempo)
grid on
xlim([shots(1) shots(ntiros)])
hold off
%pause
POSX=ones(namostras,1)*shots;
posx=reshape(POSX,prod(size(POSX)),1);
tempos=reshape(TT,prod(size(TT)),1);
nx=linspace(shots(1),shots(ntiros),40);
[NX,NT]=meshgrid(nx,t);
valores=reshape(MV2,prod(size(MV2)),1);
NM=griddata(posx,tempos,valores,NX,NT,'nearest');
subplot(1,2,2)
contourf(NX,NT,NM)
%surf(NX,NT,NM)
colormap gray
hold on
xlim([shots(1) shots(ntiros)])
plot(shots,tempo)
grid on
hold off
subplot(1,2,1)
hold on
[distancias,tempos]=ginput(ntiros)%ntiros
end

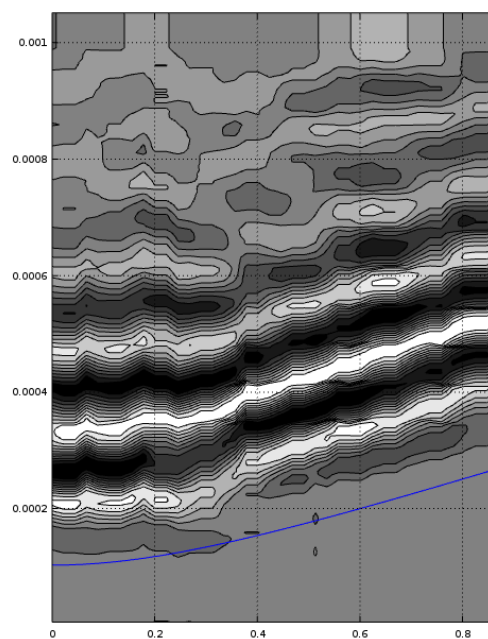
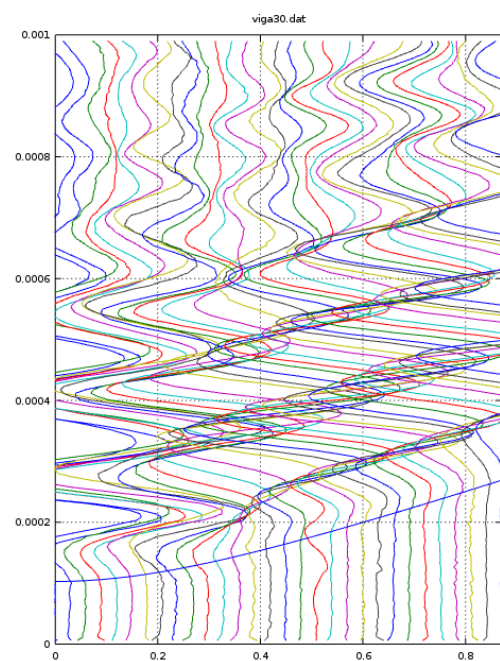
```

## Anexo 6

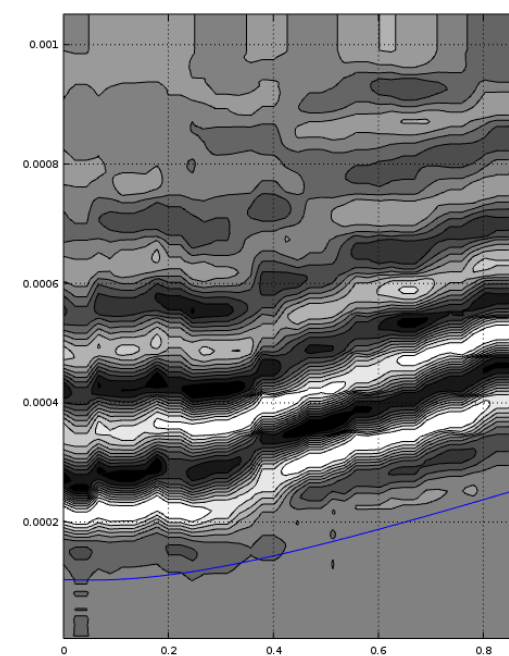
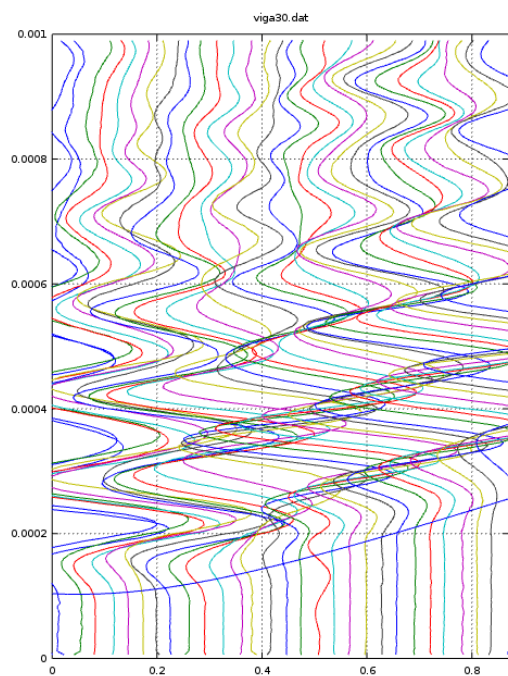
V(ar)	330	m/s		
V(pinho)	1000	m/s		
p(ar)	0,001225	g/cm <sup>3</sup>	R	0,9959656585
p(pinho)	0,4	g/cm <sup>3</sup>		
Z(ar)	0,40425			
Z(pinho)	400			

*Coeficiente de Reflexão em termos de energia ar/madeira (pinho).*

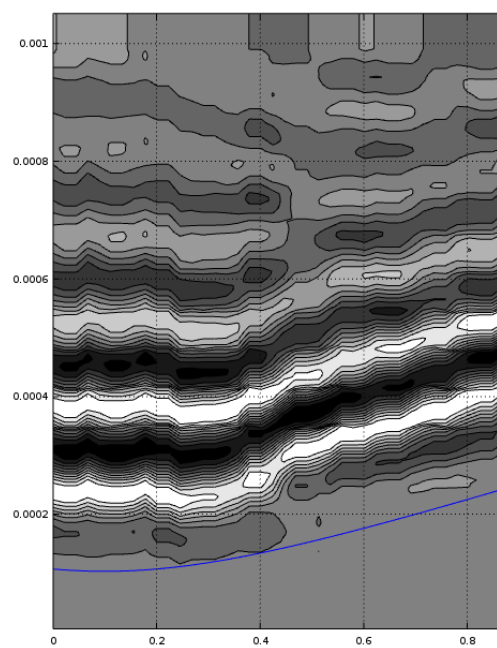
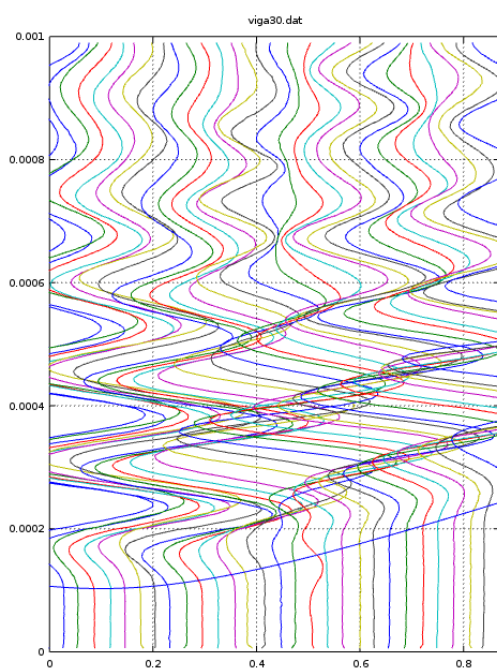
## Anexo 7



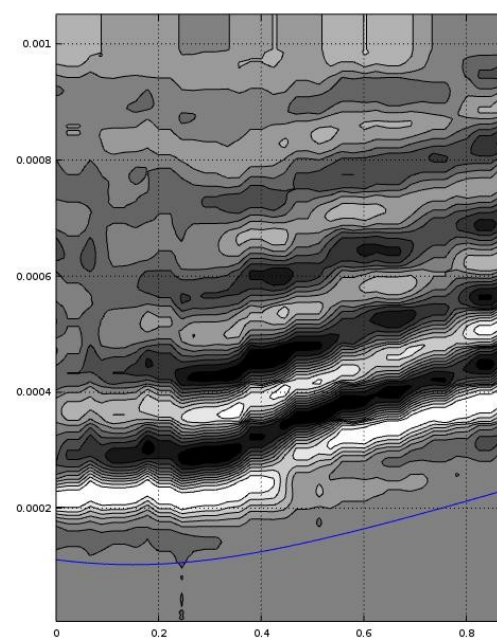
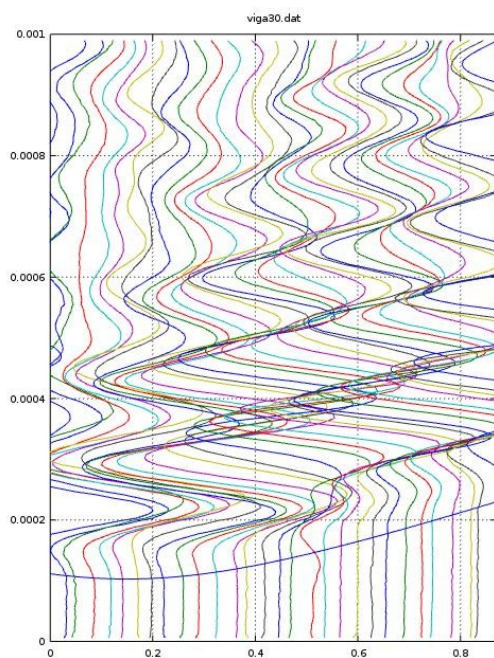
*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 1, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 2, GNU Octave.*

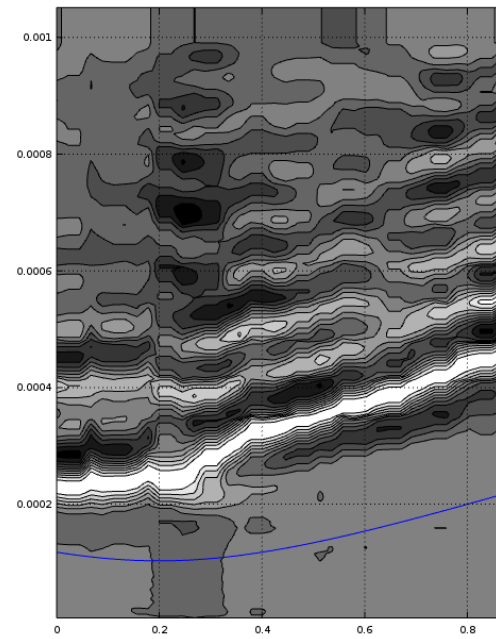
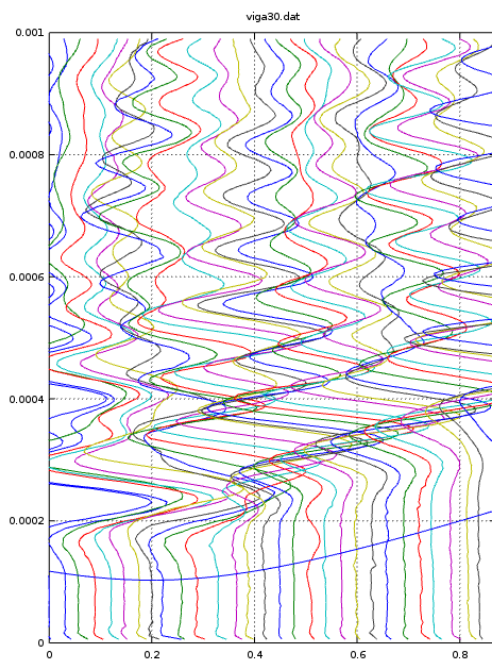


*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 3, GNU Octave.*

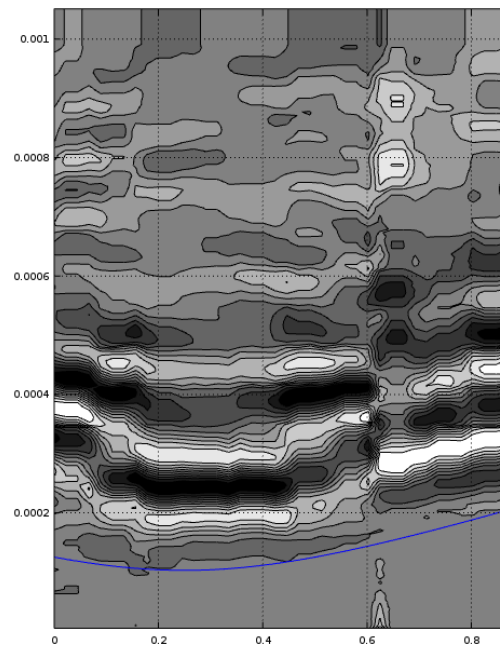
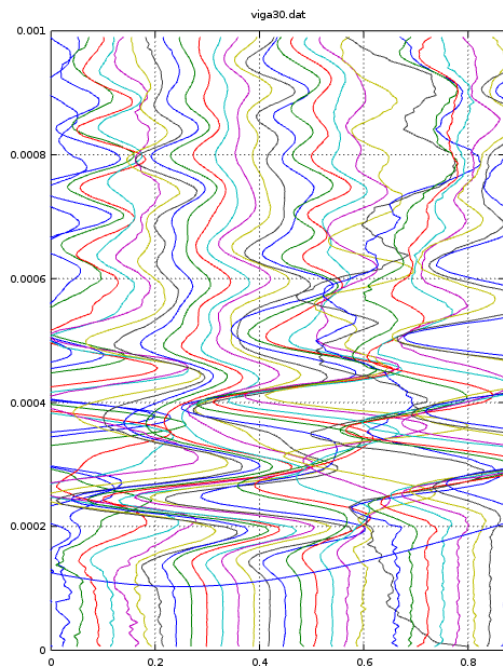


*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 4, GNU Octave.*



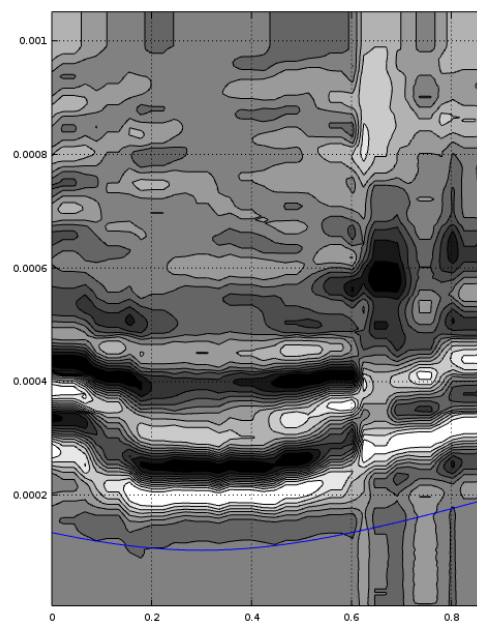
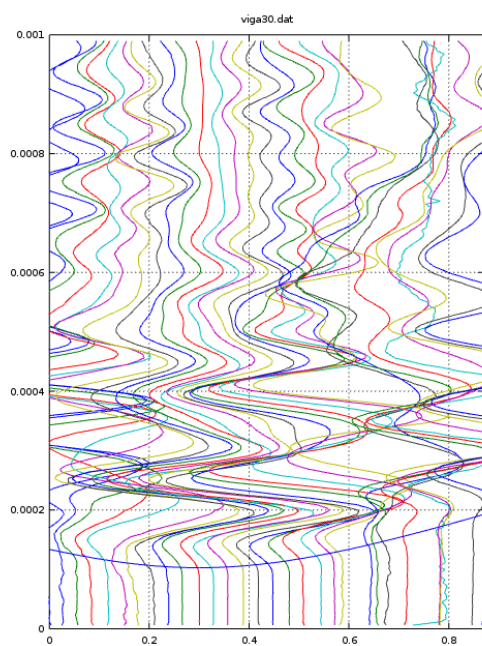


*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 5, GNU Octave.*

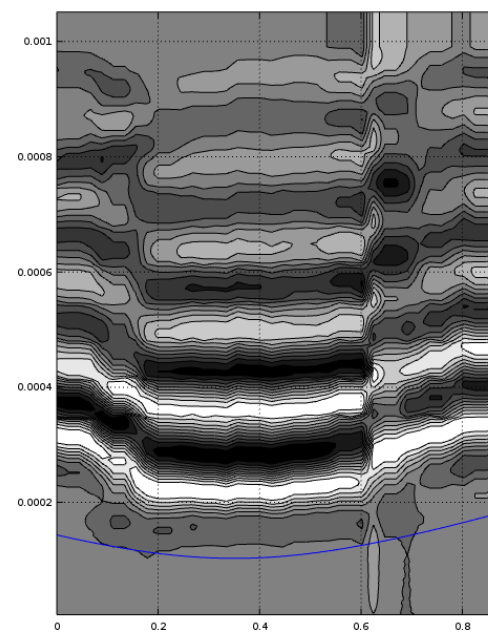
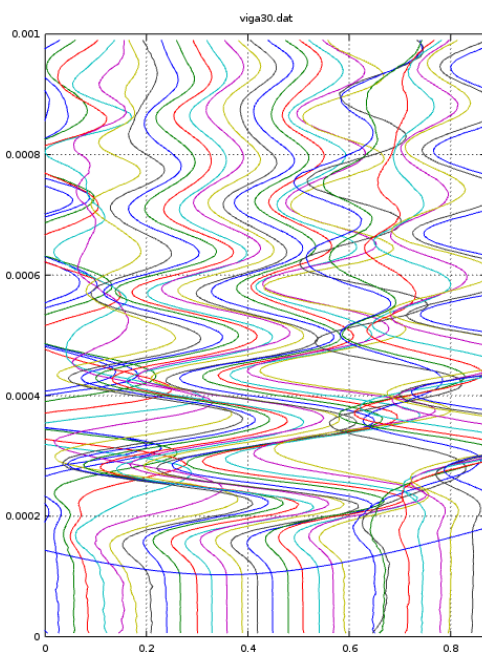


*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 6, GNU Octave.*

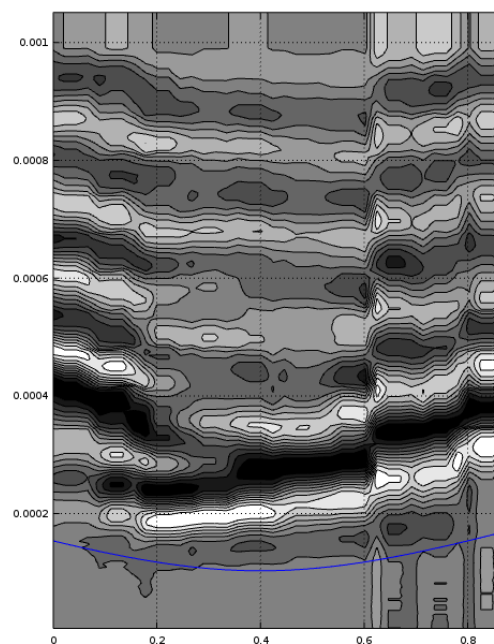
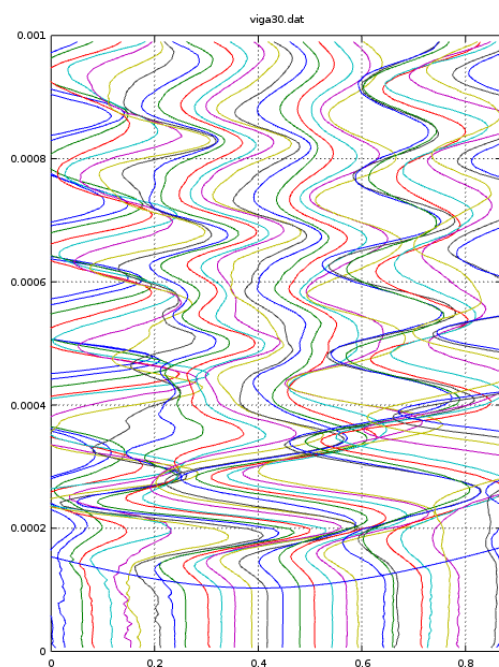




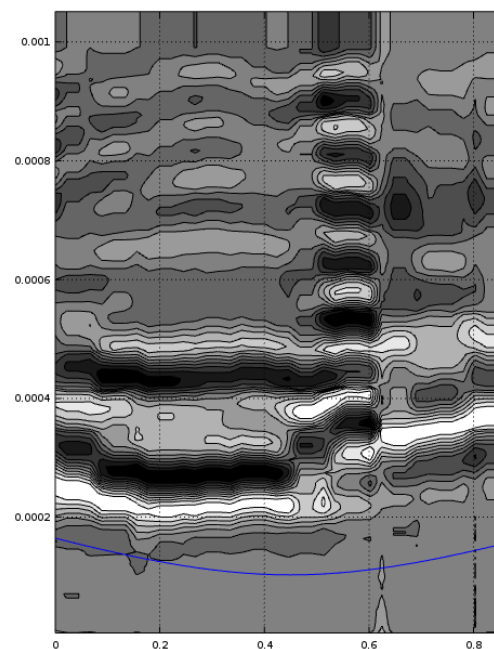
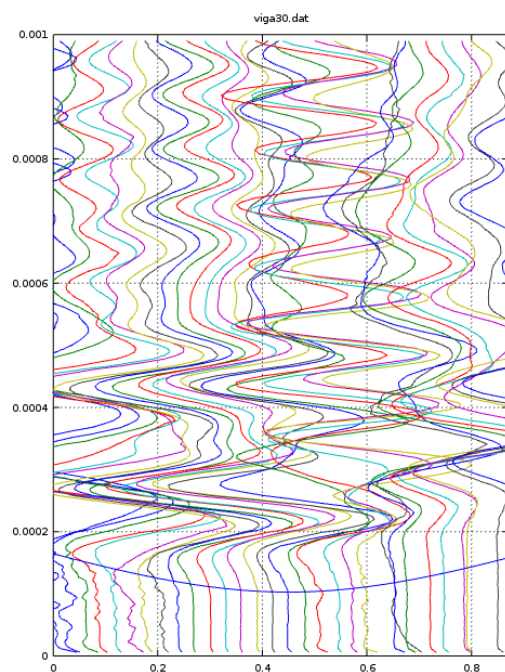
*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 7, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 8, GNU Octave.*

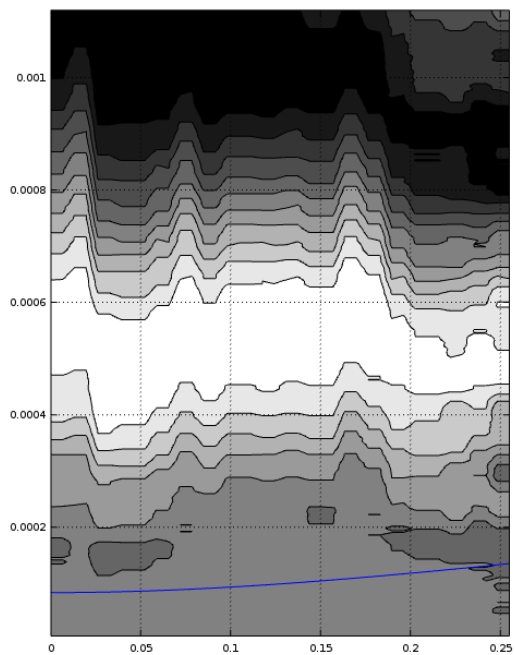
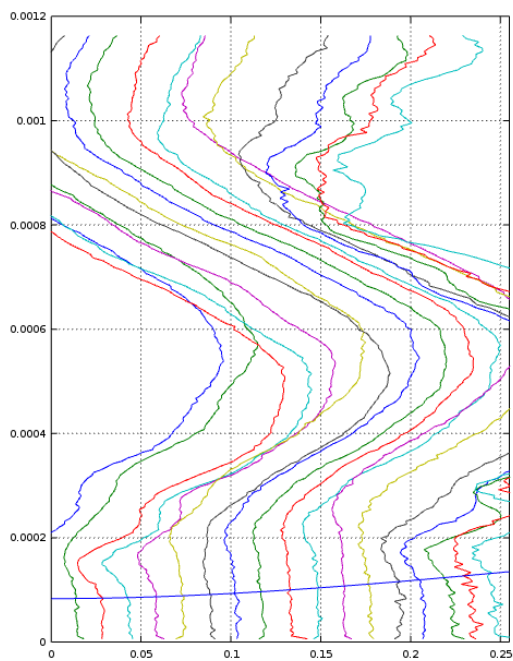


*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 9, GNU Octave.*

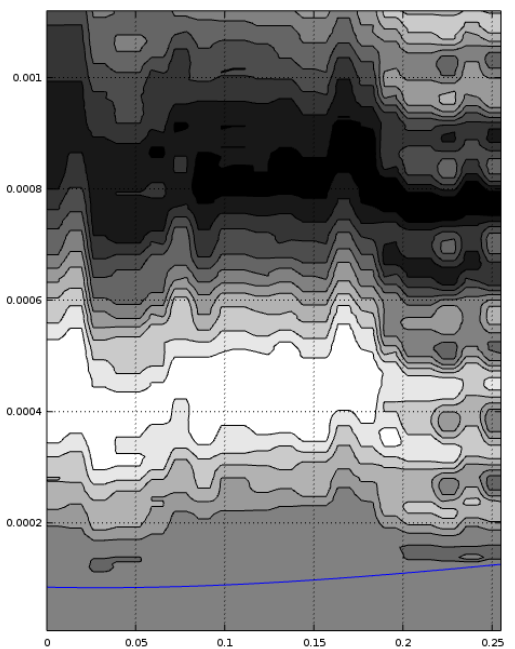
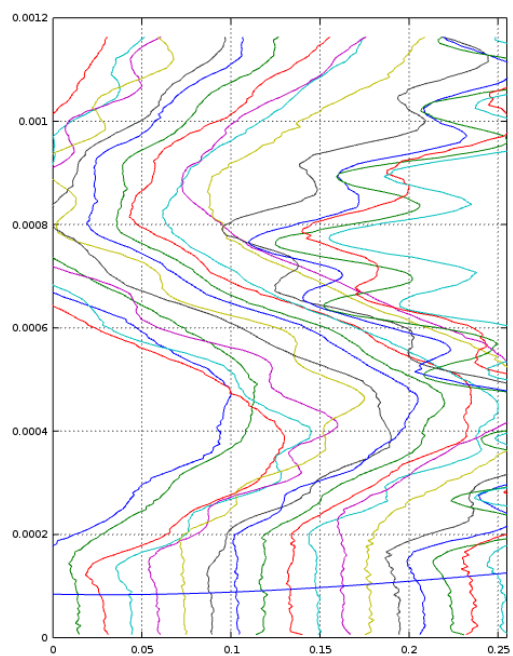


*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos na viga, canal 10, GNU Octave.*

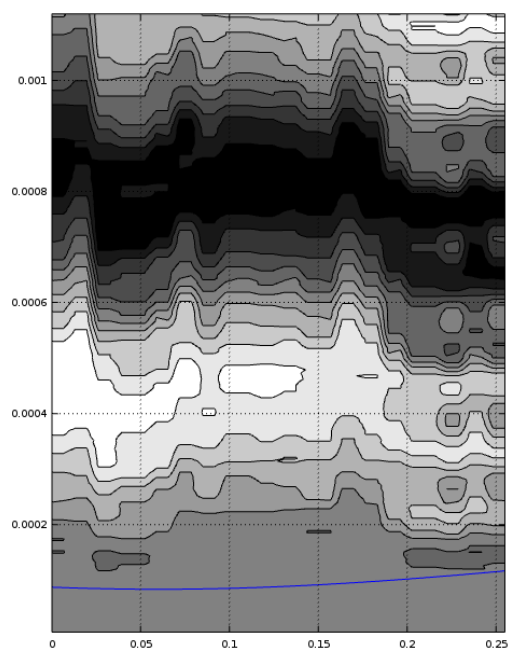
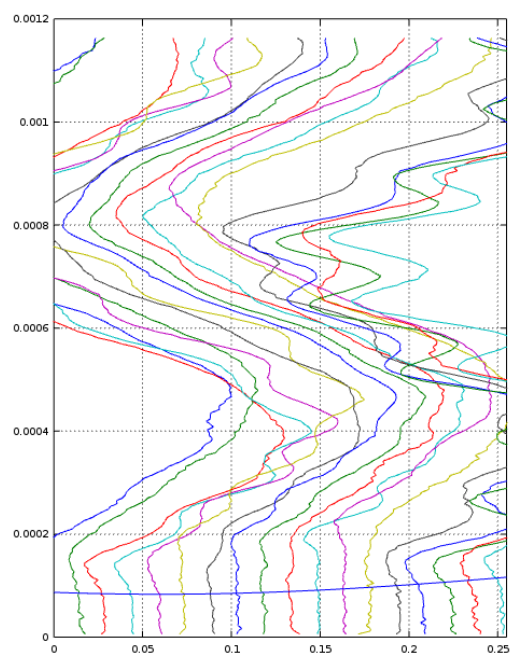
## Anexo 8



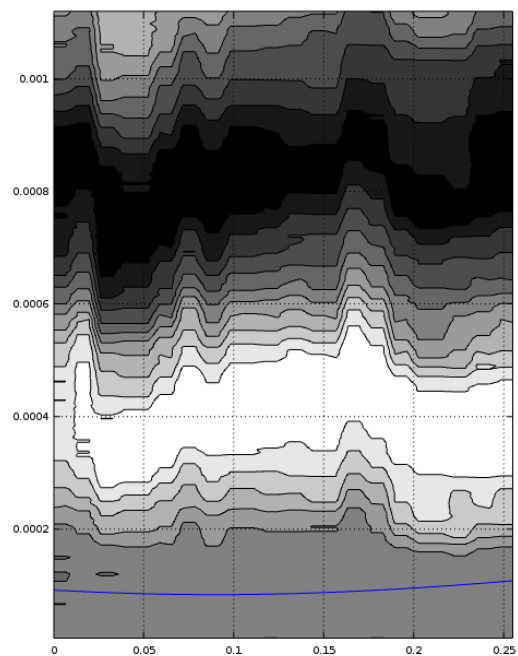
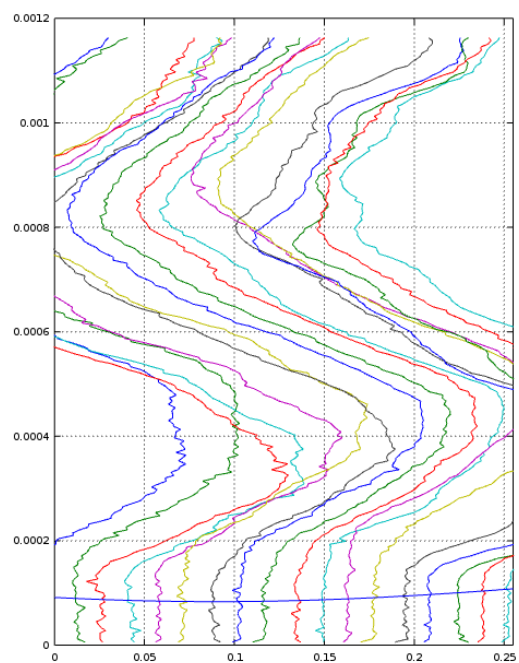
*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 1, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 2, GNU Octave.*

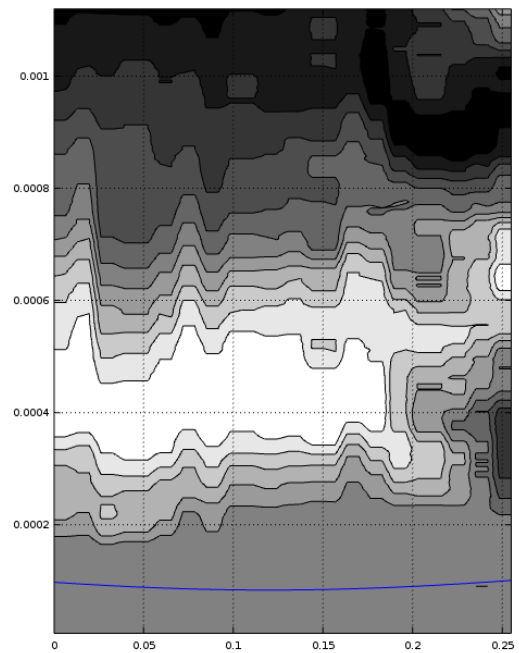
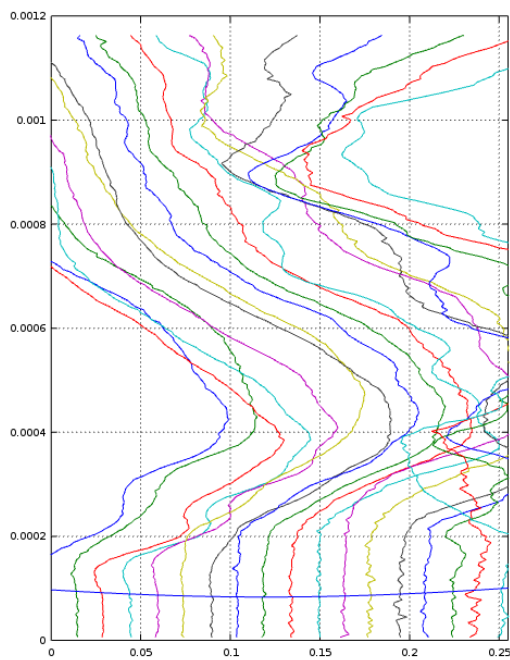


*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 3, GNU Octave.*

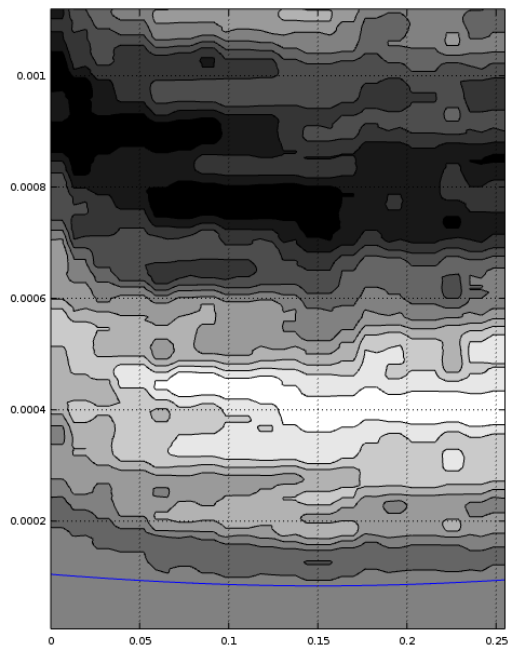
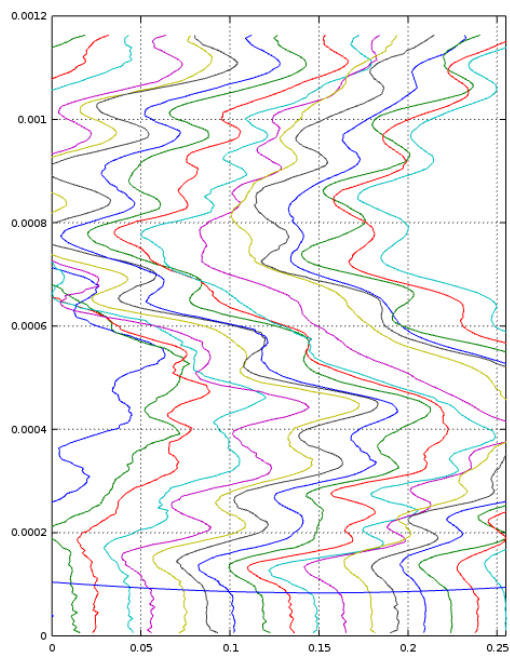


*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 4, GNU Octave.*

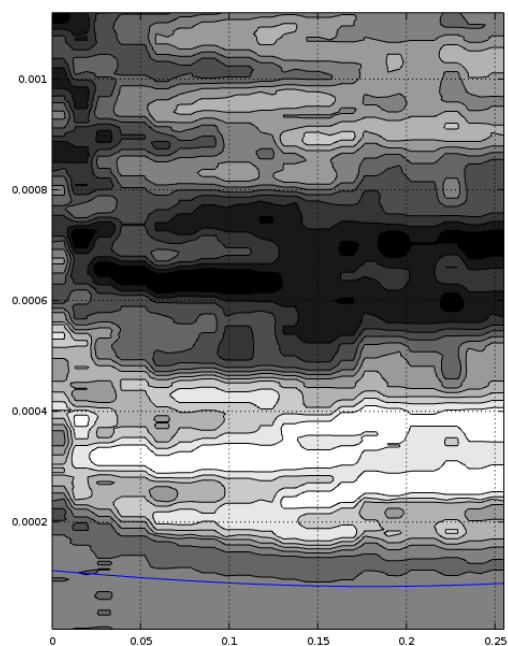
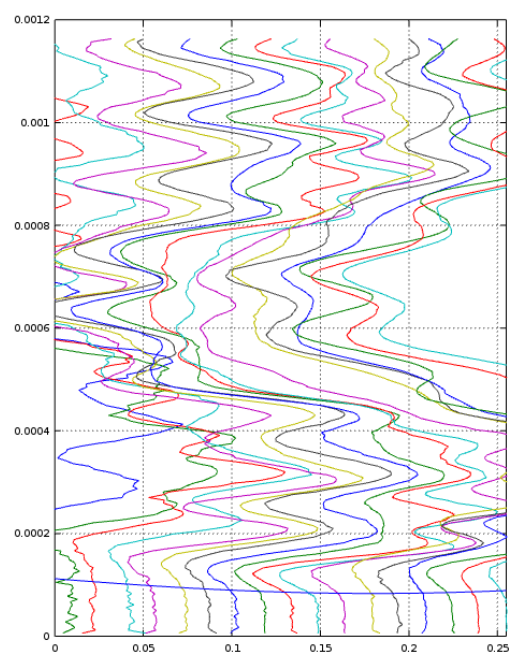




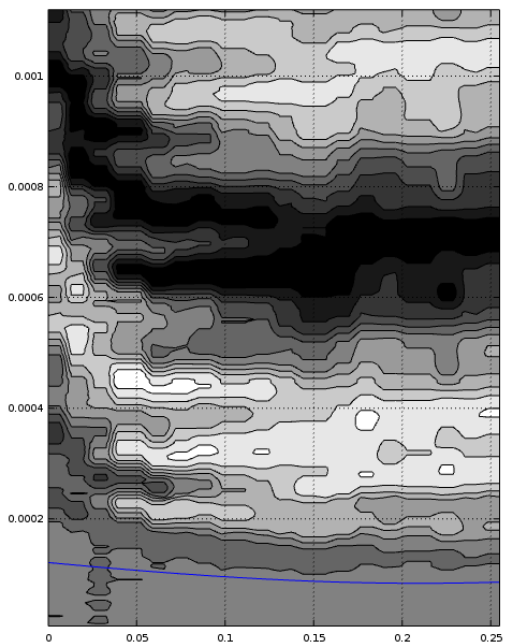
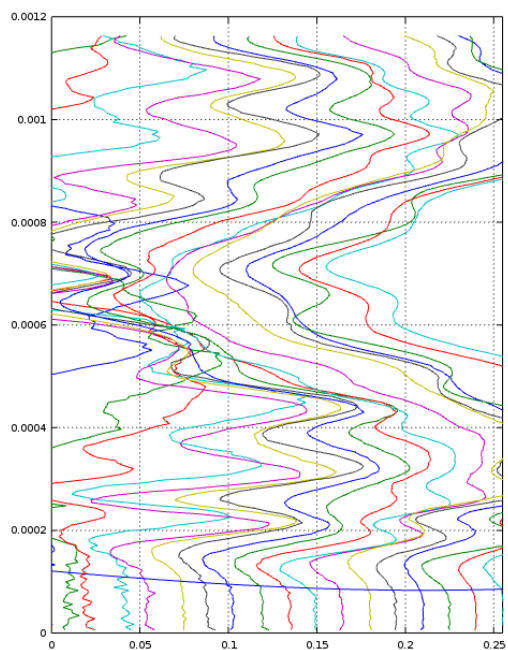
*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 5, GNU Octave.*



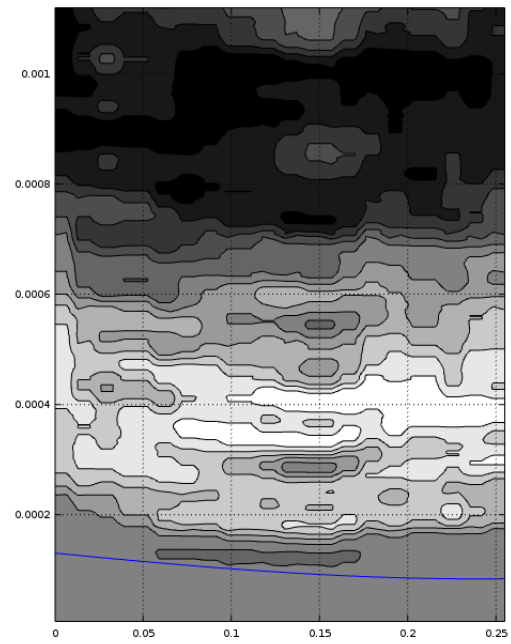
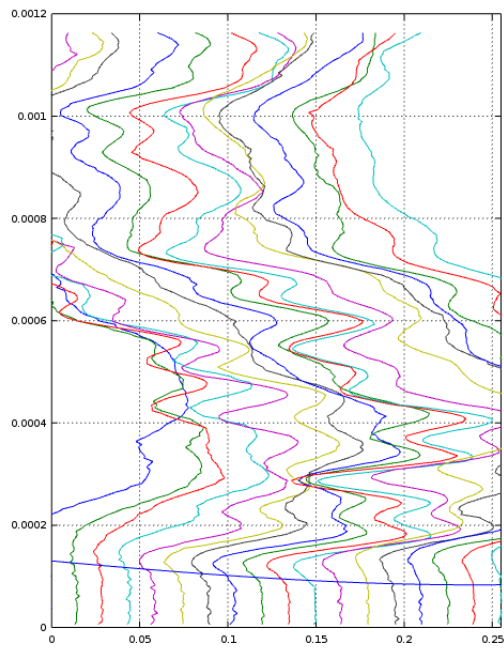
*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 6, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 7, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 8, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, 200 pontos, escala 0,15, canal 9, GNU Octave.*

## Anexo 9

V(betão)	3500	m/s		
V(água)	1480	m/s	t	0,3105981112
p(betão)	2,3	g/cm <sup>3</sup>		
P(água)	1	g/cm <sup>3</sup>		
Z(água)	1480			
Z(betão)	8050			

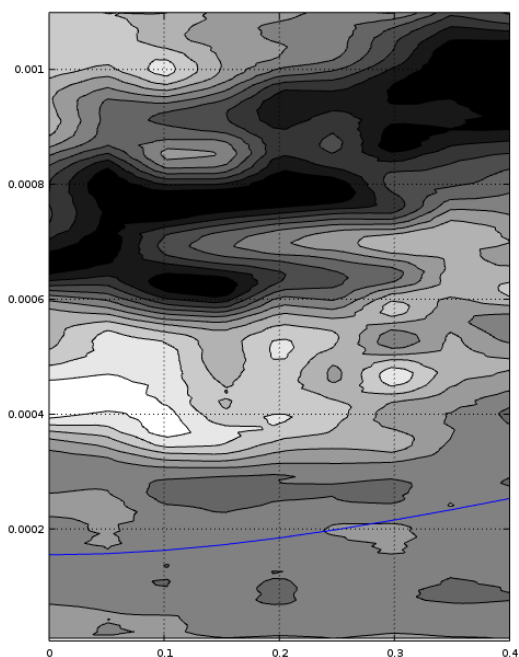
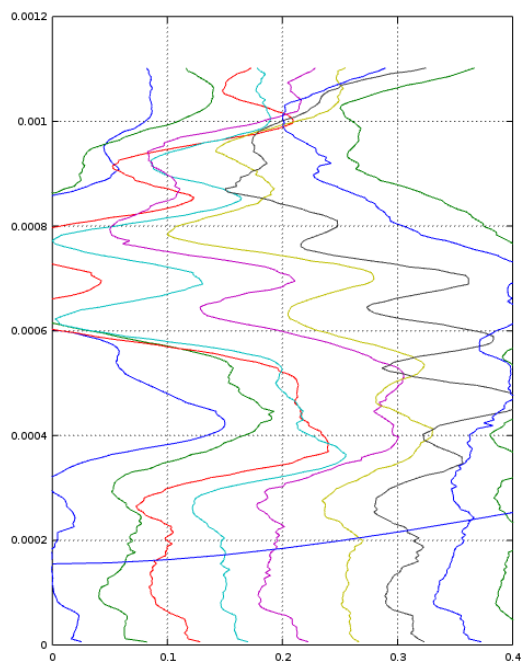
*Coeficiente de transmissão em termos de amplitude água/betão*

V(betão)	3500	m/s		
V(ar)	330	m/s	t	0,0001004297
p(betão)	2,3	g/cm <sup>3</sup>		
P(ar)	0,001225	g/cm <sup>3</sup>		
Z(ar)	0,40425			
Z(betão)	8050			

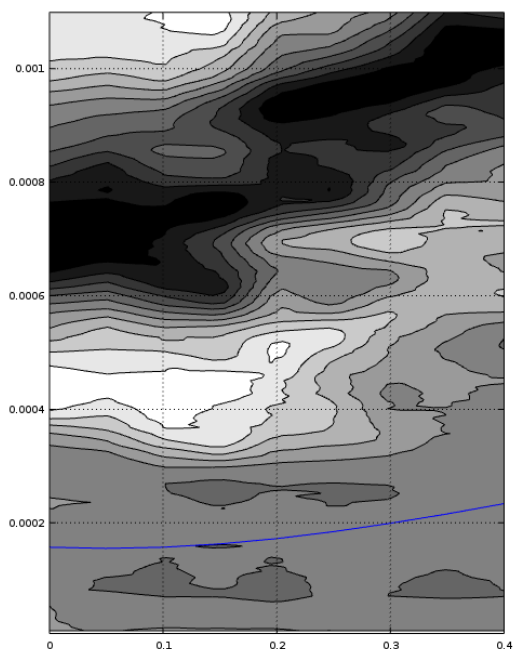
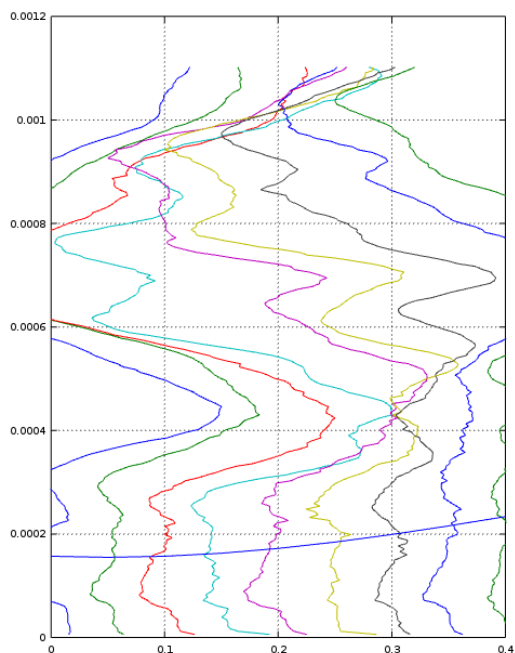
*Coeficiente de transmissão em termos de amplitude ar/betão*



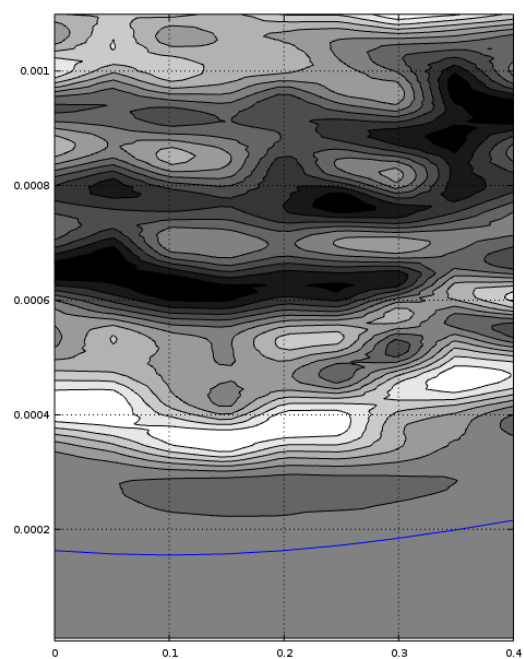
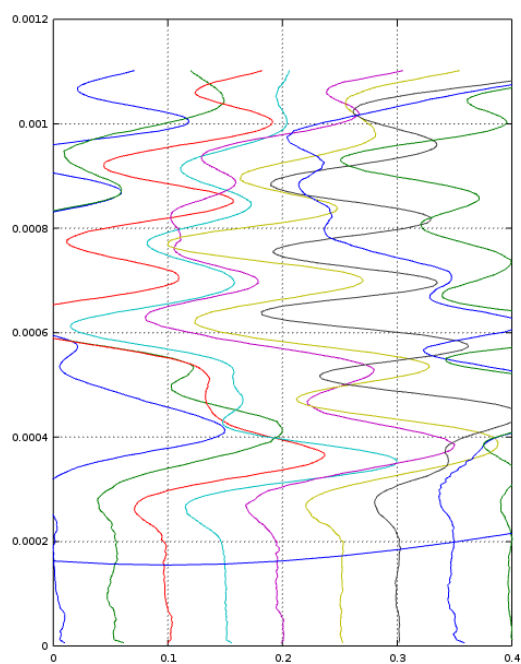
## Anexo 10



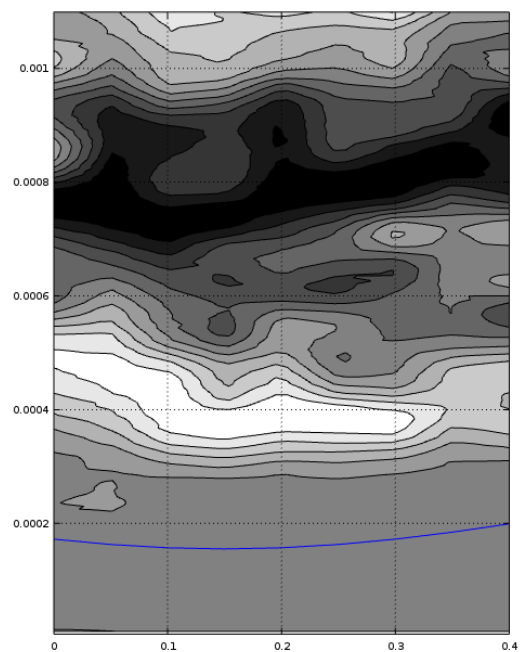
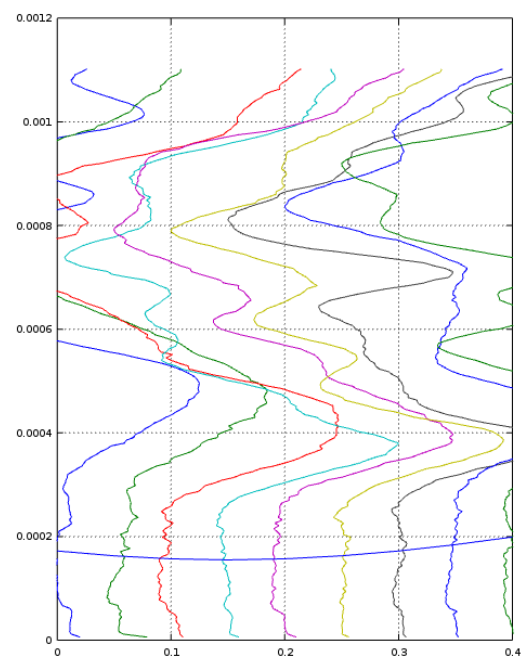
*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, 200 pontos, escala 0,15, canal 1, GNU Octave.*



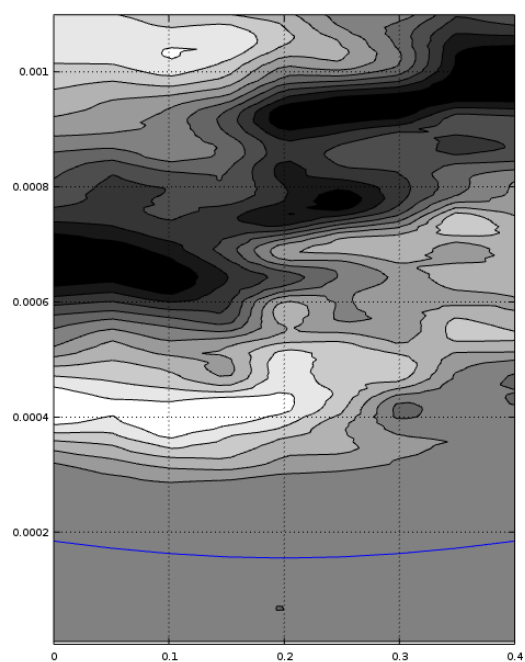
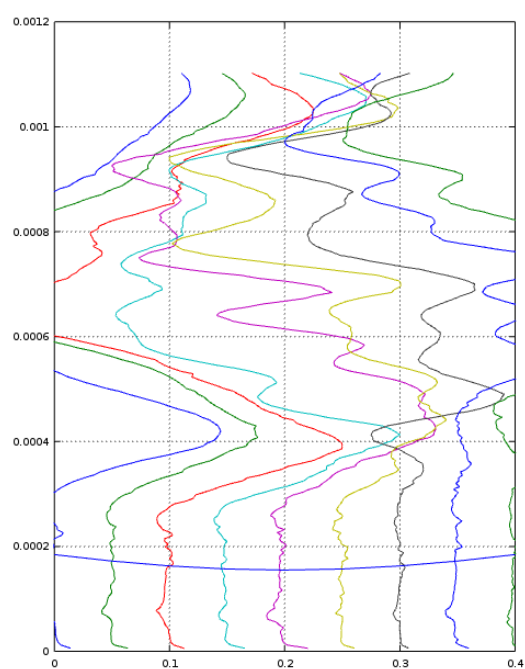
*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, 200 pontos, escala 0,15, canal 2, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, 200 pontos, escala 0,15, canal 3, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, 200 pontos, escala 0,15, canal 4, GNU Octave.*



*Representação gráfica dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, 200 pontos, escala 0,15, canal 5, GNU Octave.*

## Anexo 11

clc, clear all, close all

```
%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t1.dat%%%%%%%%%%%%%%
mesa=load('pedra2_t1.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A);
uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A=A-unsmed;
maxa=max(abs(A));
n=length(A);
t=(cumsum(mesa(1:janela,6)));
```

```
%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t2.dat%%%%%%%%%%%%%%

mesa=load('pedra2_t2.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A1=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A1);
```

```

uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A1=A1-unsmed;
maxa=max(abs(A1));
n=length(A1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t3.dat%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

mesa=load('pedra2_t3.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A2=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A2);
uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A2=A2-unsmed;
maxa=max(abs(A2));
n=length(A2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t4.dat%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

mesa=load('pedra2_t4.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A3=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A3);

```

```

uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A3=A3-unsmed;
maxa=max(abs(A3));
n=length(A3);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t5.dat%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

mesa=load('pedra2_t5.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A4=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A4);
uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A4=A4-unsmed;
maxa=max(abs(A4));
n=length(A4);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t6.dat%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

mesa=load('pedra2_t6.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A5=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A5);

```

```

uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A5=A5-unsmed;
maxa=max(abs(A5));
n=length(A5);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t7.dat%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

mesa=load('pedra2_t7.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A6=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A6);
uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A6=A6-unsmed;
maxa=max(abs(A6));
n=length(A6);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t8.dat%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

mesa=load('pedra2_t8.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A7=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A7);

```

```

uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A7=A7-unsmed;
maxa=max(abs(A7));
n=length(A7);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Pedra2_t9.dat%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

mesa=load('pedra2_t9.dat');
mesa(1,:)=[];
janela=800;
x1=mesa(1:janela,:);
x2=mesa(1001:janela+1000,:);
x3=mesa(2001:janela+2000,:);
x4=mesa(3001:janela+3000,:);
x5=mesa(4001:janela+4000,:);
x6=mesa(5001:janela+5000,:);
x7=mesa(6001:janela+6000,:);
x8=mesa(7001:janela+7000,:);
x9=mesa(8001:janela+8000,:);
x10=mesa(9001:janela+9000,:);
A8=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
uns=ones(janela,1);
meda=mean(A8);
uns=ones(janela,1);
unsmed=uns*meda;
A8=A8-unsmed;
maxa=max(abs(A8));
n=length(A8);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% espectro de frecuencia
dt=(t(n)/n)/1000000;
fny=1/(2*dt); % frecuencia de Nyquist
f=linspace(0,fny,n/2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% A  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

X1=abs(fft(A(:,1),n));
X2=abs(fft(A(:,2),n));
X3=abs(fft(A(:,3),n));
X4=abs(fft(A(:,4),n));
X5=abs(fft(A(:,5),n));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% A1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

X11=abs(fft(A1(:,1),n));
X12=abs(fft(A1(:,2),n));
X13=abs(fft(A1(:,3),n));

```



```

X14=abs(fft(A1(:,4),n));
X15=abs(fft(A1(:,5),n));
%%%%%%%%%%%%%% A2  %%%%%%%%%%%%%%%

```

```

X21=abs(fft(A2(:,1),n));
X22=abs(fft(A2(:,2),n));
X23=abs(fft(A2(:,3),n));
X24=abs(fft(A2(:,4),n));
X25=abs(fft(A2(:,5),n));
%%%%%%%%%%%%%% A3  %%%%%%%%%%%%%%%

```

```

X31=abs(fft(A3(:,1),n));
X32=abs(fft(A3(:,2),n));
X33=abs(fft(A3(:,3),n));
X34=abs(fft(A3(:,4),n));
X35=abs(fft(A3(:,5),n));
%%%%%%%%%%%%%% A4  %%%%%%%%%%%%%%%

```

```

X41=abs(fft(A4(:,1),n));
X42=abs(fft(A4(:,2),n));
X43=abs(fft(A4(:,3),n));
X44=abs(fft(A4(:,4),n));
X45=abs(fft(A4(:,5),n));
%%%%%%%%%%%%%% A5  %%%%%%%%%%%%%%%

```

```

X51=abs(fft(A5(:,1),n));
X52=abs(fft(A5(:,2),n));
X53=abs(fft(A5(:,3),n));
X54=abs(fft(A5(:,4),n));
X55=abs(fft(A5(:,5),n));
%%%%%%%%%%%%%% A6  %%%%%%%%%%%%%%%

```

```

X61=abs(fft(A6(:,1),n));
X62=abs(fft(A6(:,2),n));
X63=abs(fft(A6(:,3),n));
X64=abs(fft(A6(:,4),n));
X65=abs(fft(A6(:,5),n));
%%%%%%%%%%%%%% A7  %%%%%%%%%%%%%%%

```

```

X71=abs(fft(A7(:,1),n));
X72=abs(fft(A7(:,2),n));
X73=abs(fft(A7(:,3),n));
X74=abs(fft(A7(:,4),n));
X75=abs(fft(A7(:,5),n));
%%%%%%%%%%%%%% A8  %%%%%%%%%%%%%%%

```

```

X81=abs(fft(A8(:,1),n));
X82=abs(fft(A8(:,2),n));
X83=abs(fft(A8(:,3),n));
X84=abs(fft(A8(:,4),n));
X85=abs(fft(A8(:,5),n));

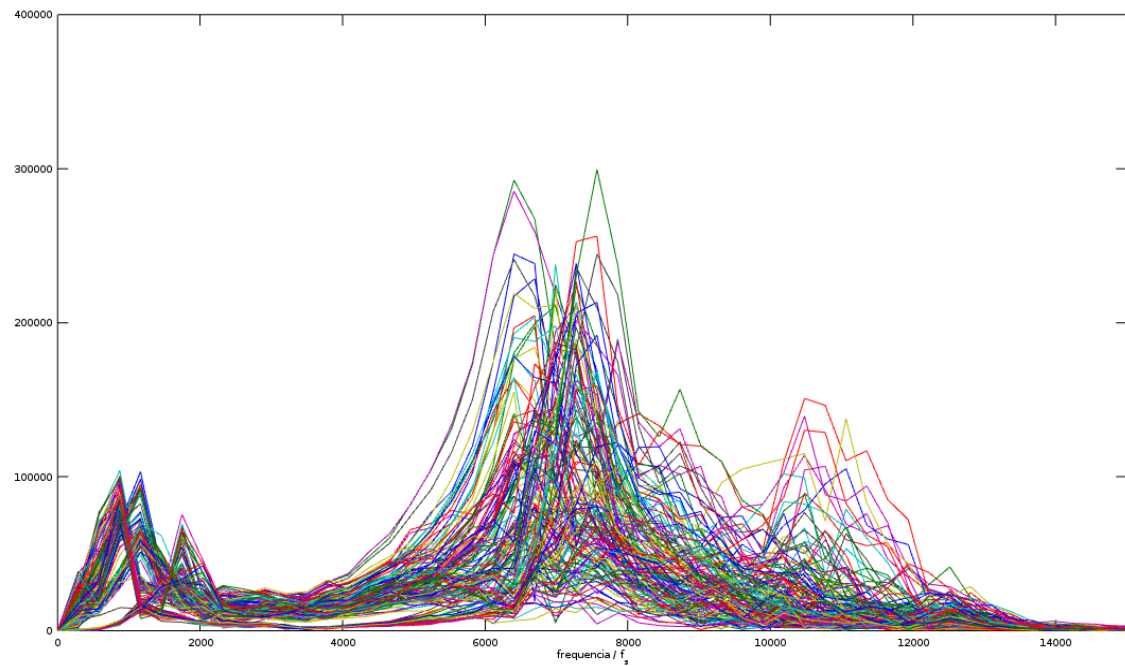
```

```

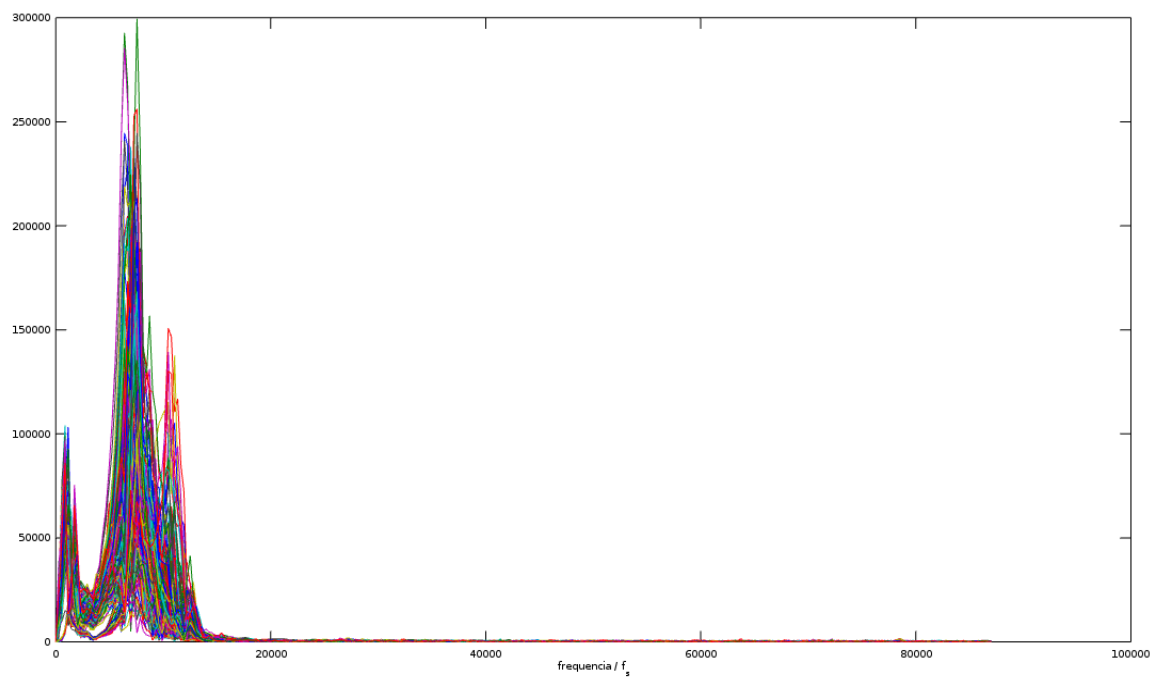
plot(f,abs(X1(1:n/2)),f,abs(X2(1:n/2)),f,abs(X3(1:n/2)),f,abs(X4(1:n/2)),f,abs(X5(1:n/2)),f,
abs(X11(1:n/2)),f,abs(X12(1:n/2)),f,abs(X13(1:n/2)),f,abs(X14(1:n/2)),f,abs(X15(1:n/2)),f,
abs(X21(1:n/2)),f,abs(X22(1:n/2)),f,abs(X23(1:n/2)),f,abs(X24(1:n/2)),f,abs(X25(1:n/2)),f,
abs(X31(1:n/2)),f,abs(X32(1:n/2)),f,abs(X33(1:n/2)),f,abs(X34(1:n/2)),f,abs(X35(1:n/2)),f,
abs(X41(1:n/2)),f,abs(X42(1:n/2)),f,abs(X43(1:n/2)),f,abs(X44(1:n/2)),f,abs(X45(1:n/2)),f,
abs(X51(1:n/2)),f,abs(X52(1:n/2)),f,abs(X53(1:n/2)),f,abs(X54(1:n/2)),f,abs(X55(1:n/2)),f,
abs(X61(1:n/2)),f,abs(X62(1:n/2)),f,abs(X63(1:n/2)),f,abs(X64(1:n/2)),f,abs(X65(1:n/2)),f,
abs(X71(1:n/2)),f,abs(X72(1:n/2)),f,abs(X73(1:n/2)),f,abs(X74(1:n/2)),f,abs(X75(1:n/2)),f,
abs(X81(1:n/2)),f,abs(X82(1:n/2)),f,abs(X83(1:n/2)),f,abs(X84(1:n/2)),f,abs(X85(1:n/2)))
xlabel('frequencia / f_s')
axis([0,15000, 0, 400000])
[frequencia, amplitude]=ginput(4)

```

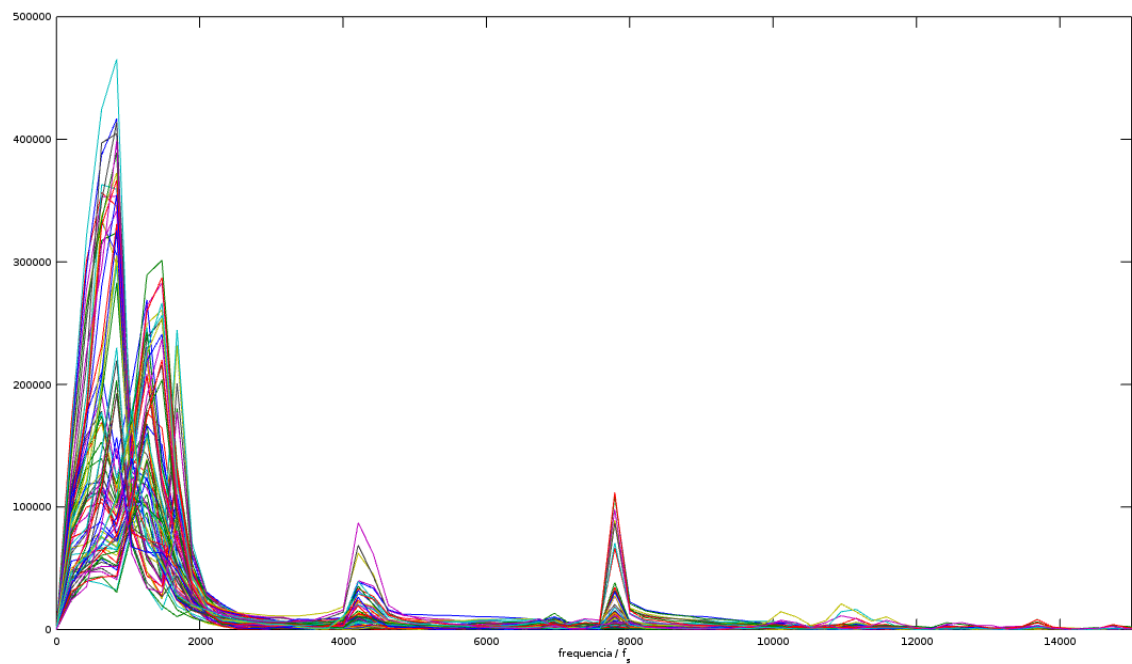
## Anexo 12



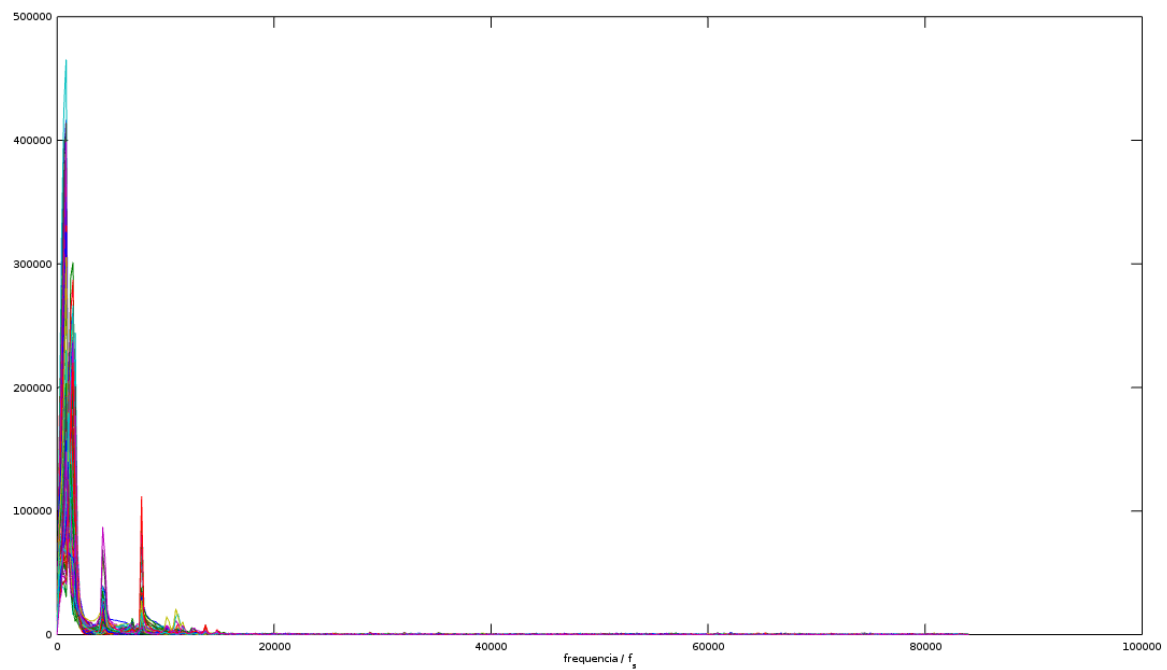
*Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos na viga, GNU Octave, frequências entre 0 e 15000Hz.*



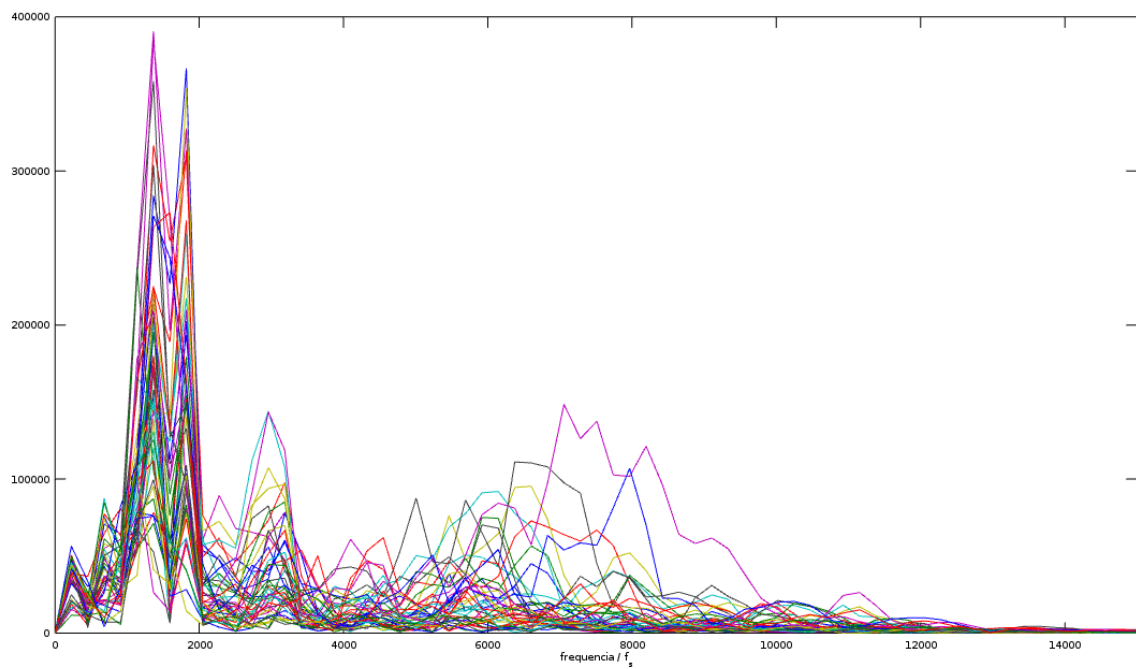
*Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos na viga, GNU Octave, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist.*



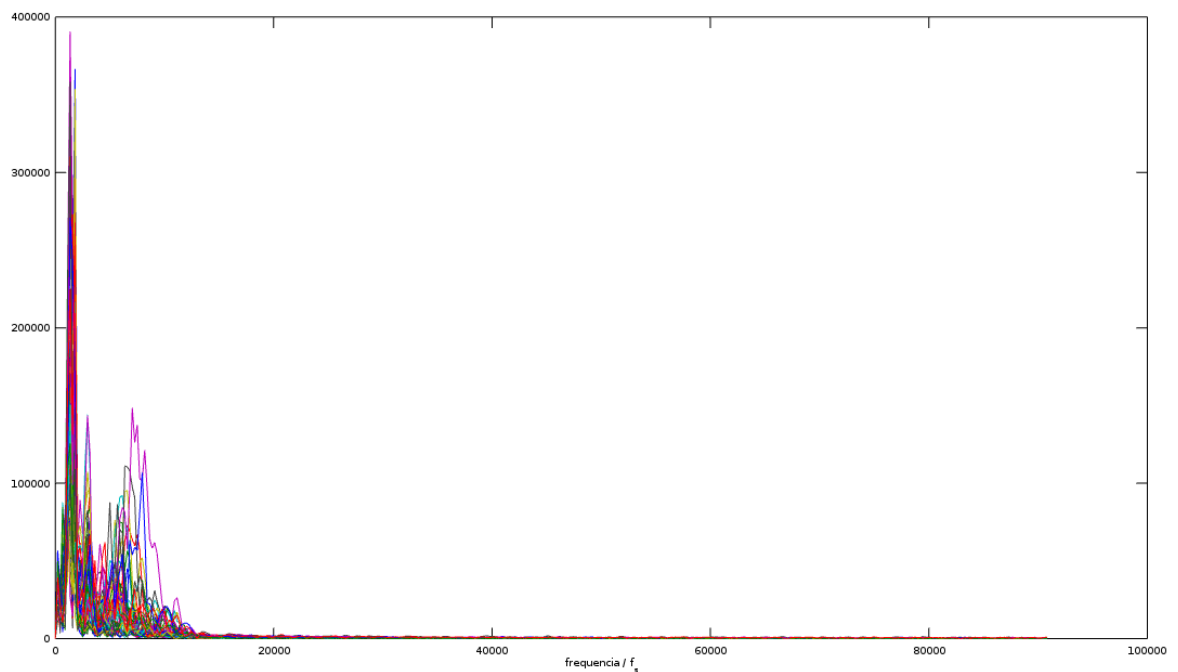
*Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, GNU Octave, frequências entre 0 e 15000Hz.*



*Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em calcário, GNU Octave, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist.*



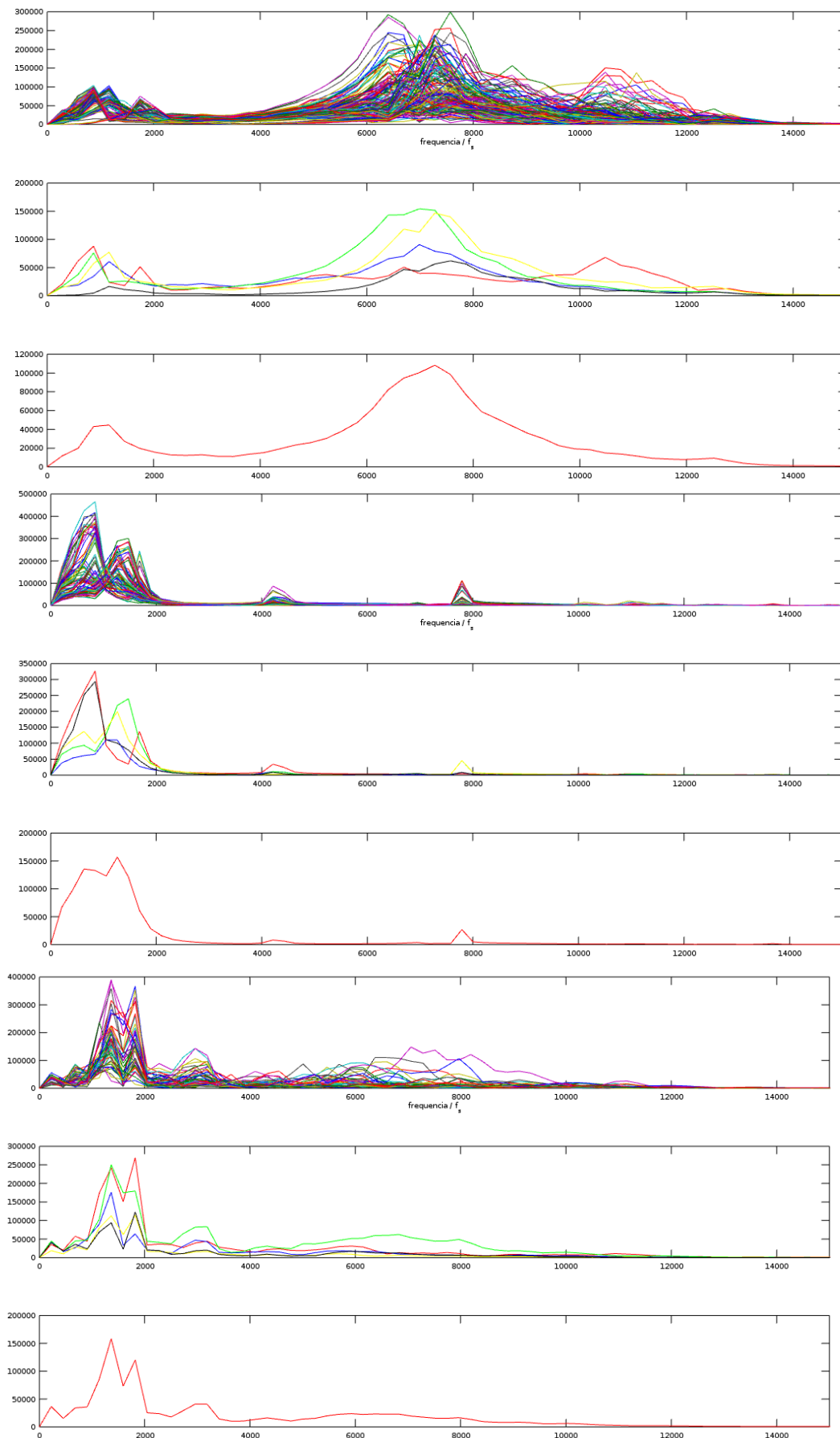
*Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, GNU Octave, frequências entre 0 e 15000Hz.*



*Espectro de frequências dos sinais sísmicos obtidos no bloco de alvenaria em granito, GNU Octave, frequências entre 0 e a frequência de Nyquist.*



## Anexo 14



*Espectro de frequências com as médias efectuadas por canal para os vários ensaios.  
GNU Octave*